

POTENCIALIDADES AGROINDUSTRIALES Y AMBIENTALES DEL  
BIOCARBÓN A PARTIR DE LA PULPA DE CAFÉ COMO ALTERNATIVA  
SOSTENIBLE DE LA ECONOMÍA CIRCULAR

SHADIA LÓPEZ ZAWADA  
YISELA MORENO OSPINA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES  
PROGRAMA DE ADMINISTRACIÓN AMBIENTAL  
PEREIRA, 2020

POTENCIALIDADES AGROINDUSTRIALES Y AMBIENTALES DEL BIOCARBÓN  
A PARTIR DE LA PULPA DE CAFÉ COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE A LA  
ECONOMÍA CIRCULAR

AUTORAS:

SHADIA LÓPEZ ZAWADA  
YISELA MORENO OSPINA

TRABAJO DE GRADO  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE ADMINISTRADORA AMBIENTAL

DIRECTOR:

JOSE ALEXANDER RODRIGUEZ  
PhD

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES  
PROGRAMA DE ADMINISTRACIÓN AMBIENTAL

PEREIRA, 2020

## AGRADECIMIENTOS

*A Dios por darme tantas bendiciones, iluminarme y permitir que haya podido terminar este sueño tan anhelado.*

*A mis padres Reynaldo y Suria, por su apoyo incondicional en todo momento de mi vida, por su sacrificio y esfuerzo, por siempre guiarme hacia el camino correcto de la vida.*

*A mi hermana Nubia, por demostrarme su apoyo incondicional para alcanzar todas mis metas.*

*A mi abuela Nubia Josefa por enseñarnos lo valioso e importante del estudio y cuán grande es el éxito cuando se culmina una etapa profesional en la vida.*

*A mi familia en general por su cariño y apoyo en cada situación de mi vida.*

*A mi novio Marco por apoyarme y darme fuerzas en todo momento para poder continuar.*

*A mi compañera Yisela Moreno por su valiosa amistad y por haber compartido este tan anhelado triunfo en nuestras vidas.*

*Al profesor José Alexander por guiarnos y haber depositado su confianza en nosotras para la elaboración de esta investigación, igualmente a todos los docentes del programa de Administración Ambiental por brindarme tanta sabiduría.*

*A mis amigos por su sincera y valiosa amistad, gracias por haber recorrido este camino tan especial conmigo.*

Shadia López Zawada

## AGRADECIMIENTOS

*A Dios por guiar y bendecir cada uno de los pasos que me llevaron a culminar con satisfacción esta etapa de mi vida.*

*A mis padres, que con amor y dedicación me han acompañado durante este recorrido, son mi gran motivación.*

*A mi familia por el apoyo y el cariño que siempre me han brindado.*

*Al profesor José Alexander Rodríguez por el acompañamiento y el esmero en el desarrollo y finalización de este proyecto.*

*A mi compañera y futura colega Shadia, por la amistad que me ha brindado y por compartir este logro que con esfuerzo conseguimos.*

*A los maestros y a cada una de las personas que de alguna manera incidieron en mi crecimiento personal y profesional.*

*A mis compañeros por los momentos y experiencias compartidas que harán de esta etapa un recuerdo inolvidable.*

*A la Universidad por darme la oportunidad de formarme y materializar el anhelo de ser una profesional.*

Yisela Moreno Ospina

## RESUMEN

El remitirse a la historia económica y empresarial de Colombia implica relacionarla con la del café, que desde su llegada al territorio aproximadamente en el año 1830 jugó un papel predominante en el progreso económico del país, alcanzando altos niveles de producción en los departamentos andinos. En la actualidad este alcance es mucho menor, sin embargo, aún se conservan e implementan las prácticas típicas de la región para su proceso productivo y de beneficio, una de ellas es el aprovechamiento del café por vía húmeda que no es exenta de producir afectaciones sobre la calidad del medio natural. La etapa de despulpado es una de las mayores generadoras de residuos sólidos como la pulpa, que constituye el desecho de gran magnitud, asimismo, el requerimiento de grandes volúmenes de agua implica el retorno de la misma como aguas residuales con unas condiciones físico-químicas distintas a las iniciales y a las que presenta el cuerpo de agua receptor, alterando las condiciones ambientales y el equilibrio de los ecosistemas terrestres y acuáticos circundantes a la zona donde se llevan a cabo actividades de caficultura.

Para subsanar los efectos del problema ambiental anteriormente citado se propuso para este trabajo efectuar una aproximación de las aptitudes físico-químicas que presenta el biocarbón como producto del aprovechamiento y transformación térmica de la pulpa de café, para su integración como estrategia de producción más limpia en el sector agropecuario en el marco de la economía circular. El desarrollo de la fundamentación teórica se hizo oportuna con el fin de contextualizar y profundizar acerca de lo que ha sido hasta hoy la economía y la caficultura colombiana, cómo se lleva a cabo el proceso de beneficios del café y cuáles son los efectos sobre el ambiente de un subproducto como lo es la pulpa; además de abordar el tema asociado al biocarbón y su integración al sistema económico circular. Posteriormente se planteó la metodología que direccionó el cumplimiento del objetivo general, partiendo de la revisión de artículos en la web que abordaran el tema producción de biocarbón con biomásas vegetales aportando a la construcción de una base de datos a la cual se le realizaron los análisis estadísticos descriptivos, de conglomerados y de varianza mediante el software Infostat obteniendo así las similitudes entre las biomásas a partir de las cuales se produce el biocarbón, agrupándolas para facilitar la identificación de los posibles usos relacionados con sus propiedades físico-químicas. El establecimiento de los beneficios socio-económicos del biocarbón de pulpa de café se dieron a través de la designación y análisis de los costos de producción utilizando el método de regresión hedónica posibilitando la comparación del contenido de macronutrientes de productos agrícolas tanto químicos como orgánicos con el biocarbón.

La revisión bibliográfica posibilitó la obtención de 32 biocarbones elaborados a partir de biomásas de diversos tipos, para facilitar el manejo de la información se hizo necesario agruparlos en 10 grupos en función de la similaridad de sus biomásas. Del análisis descriptivo se pudo identificar las semejanzas entre los grupos de biocarbones estudiados y el de pulpa de café, con relación al contenido de macronutrientes hubo mayor concordancia en cuanto al contenido de fósforo, calcio, nitrógeno, azufre y sodio; los elementos correspondientes a micronutrientes se presentó disimilitud frente a los datos del hierro, manganeso y zinc siendo fundamentales para el funcionamiento enzimático y la efectividad de los cultivos, además de presentarse valores inferiores con respecto al cobre, indispensable para el ciclo de vida de las

plantas y la producción de semillas. El análisis de las características fisicoquímicas solo se presentó similitud con la variable pH dado por la alcalinidad de la mayoría de los biocarbones. La retención de contaminantes en el suelo, la fertilidad con el fin de obtener un mayor rendimiento y eficiencia en los cultivos aportando nutrientes esenciales para el sistema suelo y la mitigación del cambio climático por su capacidad de captura y retención del Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) fueron los usos identificados a partir del análisis anterior. Por otra parte, los costos de producción del biocarbón alcanzaron un valor significativamente alto, lo cual se vio reflejado en su precio de venta, sin embargo los beneficios socioeconómicos como la generación de empleo y ambientales asociados a la mejora de la calidad ambiental en realidad reflejan y justifican los valores obtenidos, esto se puede verificar por medio de la comparación del biocarbón con fertilizantes comerciales, reconociendo que los de origen inorgánico se encuentran en desventaja en cuanto a su rentabilidad, sustentabilidad y aporte nutricional frente a los de tipo orgánico, principalmente el biocarbón.

De este estudio se pudo concluir que el biocarbón de pulpa de café presenta similitudes con algunos de los datos especificados de los elementos que componen los macronutrientes, micronutrientes y características físico-químicas de los diferentes biocarbones, esto permitió determinar aquellas variables significativas para la caracterización de los usos con los que cuenta o que puede potencializar el biochar de pulpa de café. Asimismo, se pudieron reconocer los posibles usos agrícolas del biocarbón, determinando que las biomásas de residuos de hojas, residuos de arbustos, residuos de árboles, paleta astilla, desechos alimentarios y cáscara de avellana presentan similitudes frente a los usos del biochar de pulpa de café, entre los que se encuentra la fertilización de suelos, mitigación del cambio climático, aporte de nutrientes y retención de contaminantes. Por consiguiente, la aproximación de los costos que implica su producción, reveló un valor bajo que puede brindar beneficios socioeconómicos en la incorporación de costos de mano de obra indirecta asociados a un salario mínimo más prestaciones sociales, así como una utilidad ambiental manifiesta en la disminución en la contaminación ambiental por el aprovechamiento del residuo contaminante. Por lo tanto, el biocarbón se convierte en una alternativa de producción más limpia capaz sustituir productos altamente contaminantes y nocivos para el ambiente y perjudiciales para la salud de los seres humanos, cumpliendo con los principios de actuación de la economía circular. El reto ahora es ampliar en el país el campo de investigación y aplicación del biochar.

## **PALABRAS CLAVES**

Caficultura, pirólisis, biomasa, análisis estadístico, alternativa ambiental.

## ABSTRACT

Referring to the economic and business history of Colombia implies relating it to that of coffee, which since its arrival to the territory in approximately 1830 played a predominant role in the economic progress of the country, reaching high levels of production in the Andean departments. At present, this scope is much smaller; however, the typical practices of the region are still preserved and implemented for its productive and processing process. One of them is the use of wet coffee, which is not exempt from affecting the quality of the natural environment. The depulping stage is one of the largest generators of solid waste such as pulp, which constitutes a large waste. Likewise, the requirement of large volumes of water implies the return of the same as waste water with physical-chemical conditions different from the initial ones and those presented by the receiving water body, altering the environmental conditions and the balance of the terrestrial and aquatic ecosystems surrounding the area where coffee growing activities are carried out.

In order to solve the effects of the environmental problem mentioned above, it was proposed for this work to make an approximation of the physical-chemical aptitudes that biochar presents as a product of the use and thermal transformation of the coffee pulp, for its integration as a strategy of cleaner production in the agricultural sector within the framework of the circular economy. The development of the theoretical foundation was timely in order to contextualize and deepen about what has been until today the Colombian economy and coffee culture, how the process of coffee benefits is carried out and what are the effects on the environment of a sub-product such as pulp; besides addressing the issue associated with biocoal and its integration into the circular economic system. Subsequently, the methodology that directed the fulfillment of the general objective was proposed, starting with the review of articles on the web that dealt with the subject of biocoal production with vegetable biomasses, contributing to the construction of a database to which descriptive statistical analyses, of conglomerates and of variance were carried out by means of the Infostat software, thus obtaining the similarities between the biomasses from which biocoal is produced, grouping them to facilitate the identification of the possible uses related to their physical-chemical properties. The establishment of the socio-economic benefits of biocoal from coffee pulp was done through the designation and analysis of production costs using the hedonic regression method, making it possible to compare the macronutrient content of both chemical and organic agricultural products with biochar.

The bibliographic review made it possible to obtain 32 biochars made from various types of biomass. To facilitate the management of information, it was necessary to group them into 10 groups according to the similarity of their biomasses. From the descriptive analysis, it was possible to identify similarities between the groups of biocoals studied and that of coffee pulp. In relation to the content of macronutrients, there was greater agreement regarding the content of phosphorus, calcium, nitrogen, sulfur and sodium; the elements corresponding to micronutrients were dissimilar to the data on iron, manganese and zinc, which are fundamental for the enzymatic functioning and effectiveness of the crops, in addition to lower values with respect to copper, which is essential for the life cycle of the plants and seed production. The analysis of physicochemical characteristics only showed similarity with the pH variable given by the alkalinity of most biochars. The retention of contaminants in the soil, fertility in order to obtain a greater yield and efficiency in the crops providing essential

nutrients for the soil system and the mitigation of climate change by its capacity to capture and retain Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) were the uses identified from the previous analysis. On the other hand, the production costs of biochar reached a significantly high value, which was reflected in its sale price, however the socioeconomic benefits such as employment generation and environmental benefits associated with improving environmental quality actually reflect and justify the values obtained, this can be verified by comparing biocoal with commercial fertilizers, recognizing that those of inorganic origin are at a disadvantage in terms of profitability, sustainability and nutritional contribution compared to those of organic type, mainly biochars.

From this study it was concluded that coffee pulp biochar presents similarities with some of the specified data of the elements that compose the macronutrients, micronutrients and physical-chemical characteristics of the different biochar. This allowed the determination of those significant variables for the characterization of the uses that coffee pulp biochar has or can have. Likewise, it was possible to recognize the possible agricultural uses of biochar, determining that the biomasses of leaf residues, shrub residues, tree residues, wood chips, food waste and hazelnut shells present similarities to the uses of coffee pulp biochar, among which are soil fertilization, climate change mitigation, nutrient supply and contaminant retention. Therefore, the approximation of the costs that its production implies, revealed a low value that can provide socioeconomic benefits in the incorporation of indirect labor costs associated with a minimum wage plus social benefits, as well as an environmental utility manifested in the decrease in environmental pollution by the use of the polluting residue. Therefore, biocoal becomes a cleaner production alternative capable of substituting highly polluting products that are harmful to the environment and to human health, complying with the principles of the circular economy. The challenge now is to expand the field of research and application of biochar in the country.

## **KEY WORDS**

*Caficulture, Pyrolysis, biomass, test analysis, environmental alternative.*



## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	11
OBJETIVOS .....	13
OBJETIVO GENERAL.....	13
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	14
1.1. EL CAFÉ EN COLOMBIA.....	14
1.1.1. ECONOMÍA COLOMBIANA .....	14
1.1.2. CAFICULTURA EN COLOMBIA.....	16
1.1.3. PROCESOS DEL CAFÉ .....	18
1.1.4. PULPA DE CAFÉ.....	20
1.2. BIOCARBÓN .....	22
1.2.1. ¿QUÉ ES EL BIOCARBÓN? .....	22
1.2.2. FUENTES DE PRODUCCIÓN.....	24
1.2.3. MODO DE PRODUCCIÓN .....	29
1.2.4. APLICACIÓN DEL BIOCARBÓN .....	30
1.3. INCORPORACIÓN DEL BIOCARBÓN EN LA ECONOMÍA CIRCULAR .....	33
1.3.1. LA ECONOMÍA CIRCULAR .....	33
1.3.2. CARACTERÍSTICAS DE LA ECONOMÍA CIRCULAR.....	36
1.3.3. INTEGRACIÓN DEL BIOCARBÓN A LA ECONOMÍA CIRCULAR.....	37
2. METODOLOGÍA.....	39
2.1. CONSIDERACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS LOS BIOCARBONES.....	39
2.2. DEFINICIÓN DE EFECTIVIDAD Y POSIBLES USOS AGRÍCOLAS DEL BIOCARBÓN DE PULPA DE CAFÉ .....	40
2.3. CONSTITUCIÓN DE BENEFICIOS ECONÓMICOS Y SOCIALES DEL BIOCARBÓN DE PULPA DE CAFÉ .....	40
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
3.1. RECONOCIMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE BIOCARBONES PRODUCIDOS A PARTIR DE DIFERENTES BIOMASAS.....	41
3.2. POSIBLES USOS AGRÍCOLAS DEL BIOCARBÓN DE PULPA DE CAFE .....	44
3.3. BENEFICIOS SOCIOECONÓMICOS DE LA PRODUCCIÓN DE BIOCARBÓN DE PULPA DE CAFÉ .....	48
4. CONCLUSIONES .....	54
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	55
ANEXOS .....	62

## **TABLA DE TABLAS.**

<b>Tabla 1.</b> Análisis bromatológico de la pulpa de café.....	21
<b>Tabla 2.</b> Contenido de cenizas y de minerales en la pulpa de café.....	21
<b>Tabla 3.</b> Agrupación de las biomásas. ....	39
<b>Tabla 4.</b> Promedio de los macronutrientes de los biocarbones producidos a partir de las diferentes biomásas identificadas en la revisión sistemática. ....	42
<b>Tabla 5.</b> Promedio de los micronutrientes de los biocarbones producidos a partir de las diferentes biomásas identificadas en la revisión sistemática. ....	43
<b>Tabla 6.</b> Promedio de las Características físico-químicas de los biocarbones producidos a partir de las diferentes biomásas identificadas en la revisión sistemática. ....	44
<b>Tabla 7.</b> Costos de producción de 150 Kg de biocarbón de pulpa de café.....	50
<b>Tabla 8.</b> Composición de macronutrientes en productos agrícola.....	52

## **TABLA DE FIGURAS.**

<b>Figura 1.</b> Proceso productivo del Café. . ....	19
<b>Figura 2.</b> Clasificación y tipos de biomasa.....	26
<b>Figura 3.</b> Diagrama de economía lineal.....	33
<b>Figura 4.</b> Diagrama de economía circular .....	34
<b>Figura 5.</b> Principios de actuación de la economía circular. ....	35
<b>Figura 6.</b> Ciclos en la economía circular. ....	36
<b>Figura 7.</b> Incorporación del biocarbón de pulpa de café en proceso de la economía circular. ....	38
<b>Figura 8.</b> Análisis de conglomerados de las diferentes biomásas. ....	45

## INTRODUCCIÓN

El proceso tradicional del beneficio del café colombiano se ha diferenciado de aquellos que son desarrollados en otros países productores debido a las condiciones naturales y ambientales que se tienen en el territorio, logrando así el reconocimiento a nivel mundial por su calidad y convirtiéndolo en un orgullo patrio (Cenicafé, 2016), sin embargo esta distinción trae consigo efectos representativos y no muy favorables que se manifiestan en el deterioro ambiental del territorio, el uso intensivo del suelo y la implementación de productos químicos como herbicidas, insecticidas y fertilizantes son algunos de los causantes de la degradación, sin embargo existen otros elementos no antrópicos que generan impactos sobre el ambiente y son aquellos que provienen de la misma planta de café convertidos en subproductos durante el proceso del beneficio del mismo, entre ellos se encuentra la pulpa y el mucílago, los cuales son dispuestos inadecuadamente afectando suelos y cuerpos de agua, siendo los responsables de las tres cuartas partes de la contaminación potencial que se puede producir en los beneficiaderos de café (Federación Nacional de Cafeteros, 2016).

El reto está en generar una alternativa de solución que promueva el aprovechamiento de la pulpa de café de forma sostenible, considerada como un producto con potencialidades para ser integrado en otras o en la misma cadena productiva, saliendo del paradigma del modelo convencional de flujo y energía lineal y así poder integrarlo a un nuevo modelo de recirculación de residuos como materia prima apostándole al desarrollo sostenible, a la prosperidad económica y equidad social sin perjudicar el ambiente, esto permite asociar la labor del Administrador Ambiental, quien demuestra sus capacidades en la identificación de las problemáticas y oportunidades ambientales a partir de un enfoque holístico, sistémico e interdisciplinario; participando en el diseño y operación de tecnologías limpias en pro de la minimización de los impactos ambientales.

La economía circular se considera como una de muchas estrategias para tratar esta problemática, pues en las últimas décadas su fomento ha tomado fuerza debido a que se rige bajo los principios de preservar y mejorar el capital natural, optimizar los rendimientos de los recursos y promover la eficacia de los sistemas, logrando que los productos, componentes y materias tengan una máxima utilidad en todo momento (Fundación Ellen MacArthur, 2012). Esto permite constituir el mecanismo ideal para la disminución de los impactos ambientales de las diferentes industrias promotoras de desarrollo social y económico en todas las naciones; siendo este mismo un dinamizador adoptado hoy por países como China, Alemania, Japón y aquellos que hacen parte de la Unión Europea (Moraga et al., 2019).

Por lo anterior se plantea el estudio de un subproducto derivado del beneficio del café como lo es la pulpa que cumpla con las características y necesidades requeridas para su reincorporación a procesos productivos bajo la noción de la economía circular. El biocarbón elaborado a base de pulpa de café es considerado como una opción que puede contribuir con la sostenibilidad ambiental, económica y productiva de la sociedad. La producción de biocarbón es un proceso donde se lleva a cabo la descomposición térmica de materiales orgánicos (biomasa) con escaso o limitado suministro de oxígeno, proceso denominado pirólisis (Escalante et. al, 2016), el cual potencializa las propiedades físico-químicas de los materiales que produce como lo son gases, sólidos y líquidos (Lehmann y Joseph, 2015).

El producto sólido denominado biocarbón o biocarbón es utilizado en diversas actividades agrícolas e industriales, como potencializador de la fertilidad y calidad de los suelos, descontaminación de metales pesados presentes en suelos y aguas, adsorción de gases contaminantes, reducción de emisiones de efecto invernadero, producción de energía y como materiales en procesos industriales (Bernardo, Lapa, Gonçalves, Mendes y Pinto, 2012; Lehmann y Joseph, 2015), entre otros usos por descubrir dado que se considera un área de investigación reciente y con importantes aportes en el marco de la economía circular, por ser el biocarbón un producto que utiliza residuos provenientes de los sectores agrícolas, pecuarios, forestales, industrial y urbanos como materia prima, aprovechando los gases para el procesamiento y activación del producto principal. En el caso de la pulpa de café Bressani (1978) afirma según estudios que esta se puede utilizar como fertilizante orgánico por su alto contenido de nutrientes y así como también para la producción de gas biológico, otros investigadores han realizado grandes avances respecto a estudios específicos para la utilización de la pulpa de café como alimento para rumiantes.

Cabe resaltar que en Colombia tanto la investigación como los procesos de elaboración de biocarbón no han tenido un estudio y aplicabilidad tan relevante como los que se han llevado a cabo en otros países. Sin embargo, es de resaltar el interés que se ha generado entre la comunidad académica-científica por el desarrollo investigativo que se ve reflejado en tesis doctorales como la de Reyes (2018), trabajos de grados como los presentados por Reina (2018) y Montoya (2016), así como también se incluyen otros estudios de carácter científico como los artículos elaborados por Pérez et. al (2015) y Sánchez et. al (2020), documentos en los que se describe el proceso de elaboración, composición y aplicabilidad del biocarbón en distintas instancias y los beneficios y restricciones que esto conlleva.

Por medio de este trabajo de grado se pretende contribuir con nuevos hallazgos que amplíen el campo de estudio e investigación sobre el biocarbón, para ello fue necesario en primera instancia, realizar una fundamentación teórica que permitiera contextualizar y dar a conocer los temas esenciales para el desarrollo de esta investigación. Posteriormente se expone la metodología, la cual consistió en la identificación de las propiedades físico-químicas del biocarbón de pulpa de café por medio de la revisión sistemática en sitios web de artículos investigativos asociados a temas de producción y caracterización de biocarbones, esto permitió la construcción de una base de datos que sirviera de insumo para llevar a cabo su análisis descriptivo. La implementación de técnicas como la de conglomerados y análisis de varianza facilitaron la definición de los posibles usos agrícolas del biocarbón y a partir del Método de Precios Hedónicos se pudieron establecer los beneficios socioeconómicos y ambientales que ofrece el biocarbón objeto de estudio.

Asimismo se presentaron los resultados obtenidos tras un proceso de análisis que diera cuenta de las potencialidades físico-química adaptables a la economía circular para su incorporación en procesos agrícolas y en soluciones ambientales de las mismas industrias, convirtiéndose en una estrategia rentable y sostenible que permite establecer un equilibrio entre el crecimiento económico, el bienestar socioambiental y el aprovechamiento de los recursos, por consiguiente, no sólo favorece la generación utilidades y puestos de trabajo sino que al mismo tiempo este modelo de producción y consumo de ciclos cerrados limita el deterioro medioambiental, el cambio climático y los daños irreversibles en la biodiversidad (Moreno, 2018).

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Estimar las potencialidades físico-químicas del biocarbón producido a partir de pulpa de café, con el fin de incorporarlo al sector agropecuario como estrategia de producción más limpia.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ❖ Reconocer las propiedades físico-químicas de biocarbones producidos a partir de diferentes biomasas.
- ❖ Determinar los posibles usos agrícolas y la efectividad de la implementación del biocarbón de pulpa de café.
- ❖ Establecer los beneficios económicos y sociales de la producción de biocarbón de pulpa de café dentro del marco lógico de la economía circular.

## **1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

### **1.1. EL CAFÉ EN COLOMBIA**

#### **1.1.1. ECONOMÍA COLOMBIANA**

Como lo explica (Ocampo, 2019) en los primeros años de la República, la economía colombiana se caracterizaba por una economía enfocada en el sector agropecuario de manera tradicional y con la escasa conexión entre las muy diversas regiones del país, dos características que se mantuvieron por mucho tiempo, en la colonia el principal producto de exportación era el oro, aunque con un gradual aumento de la producción en Antioquia y un retroceso del Pacífico colombiano. El crecimiento económico durante la primera década del siglo XIX fue, sin embargo, muy lento

Los principales cambios fueron evidentes a mediados del siglo XIX con el desarrollo de los productos de exportación. El oro fue la base mínima al comercio del país, representando un tercio hacia 1830 y entre una cuarta y una quinta parte del valor exportado de ahí en adelante. El tabaco tuvo un auge hacia 1845 y alcanzó una participación cercana al 40% del total exportado en 1866. La quina alcanzó a ser un 30% de las exportaciones en 1882 y una década después se desaparece, siendo sustituida por drogas sintéticas. El café, por el contrario, alcanza el 20% del valor exportado en 1880 de la región de Cúcuta y el 35% una década más tarde donde participan Santander, Cundinamarca y Tolima, para alcanzar la mitad en 1910 y el 70% en 1925. El valor de la exportación se fortalece más con el cultivo del banano que alcanza a ser entre el 10 y el 8% de su total entre 1905 y 1925 (Kalmanovitz, 2015).

Dado esto, las iniciativas industriales se remontaban a experimentos pioneros de fines del siglo XIX y comienzos del XX. A partir de 1890 el país inició un proceso de industrialización, el cual permitió el establecimiento de talleres mecanizados que emplearon trabajadores asalariados y permitieron que ingenieros y técnicos iniciaran su formación en la experiencia productiva de la misma, estas industrias contaban con servicios adecuados de energía motriz, primero hidráulica y luego eléctrica en plantas propias o administradas por los municipios (Kalmanovitz, 1994).

Colombia evitó en gran medida la crisis latinoamericana de la deuda de los años 80, pero a partir de entonces entró en un proceso de un crecimiento menor con respecto a las otras economías. La expectativa de que la apertura económica de comienzos de los años 90 acelerara el crecimiento no se realizó, la causa básica de la desaceleración ha sido una fuerte y prolongada desindustrialización y dificultades del sector agropecuario para adecuarse a una economía más abierta. El gran cambio positivo ha sido la creciente importancia de los sectores petrolero y mineros, especialmente del primero, que se consolidó en las primeras décadas del siglo XXI.

Según Ramírez (2020), Colombia ha sido uno de los principales países en Latinoamérica que ha demostrado crecimientos sostenidos con respecto a los demás países en materia económica; manteniendo los índices de manera competitiva, la inversión creció gracias al gobierno donde se implementó la seguridad democrática, eso permitió a los diferentes sectores encontrar nuevas oportunidades, recibir mejores inversiones, en tecnología y otras

materias primas para desarrollar nuevas industrias, y crear nuevos crecimientos en los diferentes sectores.

Uno de los sectores que ha aportado a la economía colombiana en gran escala es el sector agropecuario compuesto por el sector agrícola y el sector pecuario, dando un énfasis hacia el sector agrícola este es capaz de desempeñar funciones importantes para el conjunto del desarrollo económico de los diferentes países como lo es para el caso de Colombia, principalmente por el aumento de los ingresos de exportación, la generación de empleo, la mejoría de la seguridad alimentaria y la capacidad para contribuir a la erradicación de la pobreza tanto rural como urbana (Bejarano,1998).

Según Villanueva (2018) históricamente los productos agrícolas eran el principal componente de las exportaciones hasta mediados de los 80, representando el 54% del valor total de las exportaciones de bienes y servicios. Esta proporción descendió hasta el 31% en el período de 1987 a 1999 y hasta el 20% en 2000-05. Colombia ha sido un exportador neto de productos agroalimentarios durante el período 1990- 2013, pero la balanza comercial del sector agroalimentario se ha ido reduciendo en los últimos años. El valor de las exportaciones agrícolas descendió tras la crisis económica mundial y la temporada de lluvias de 2009-10, que afectó gravemente a la producción agrícola.

Dado a los diferentes acontecimientos que se puedan presentar, las perspectivas de crecimiento en el sector agropecuario siguen siendo positivas, como lo explica Finagro (2014) principalmente por tres factores: 1)El incremento en la demanda mundial de alimentos que se conjuga con las condiciones geoclimáticas colombianas y permiten el aumento sostenido de la oferta agropecuaria; 2)La evolución reciente de sector agropecuario que ha mostrado un crecimiento superior al de otros renglones de la economía y 3)El incremento del gasto del Gobierno Nacional dirigido al sector agropecuario.

Los diferentes productos del sector agropecuario son de gran importancia para el dinamismo de este, algunos de ellos son de vital aporte para la seguridad alimentaria del país, el empleo rural y el comercio internacional, a partir de esto se identifican los productos fundamentales para el desarrollo completo de este sector económico, según Finagro (2014) son 15 los productos principales para desarrollo del sector:

1. Arroz
2. Banano y Plátano
3. Cacao
4. Café
5. Caña de Azúcar y de panela
6. Maíz
7. Palma de aceite
8. Flores
9. Frutales
10. Hortalizas
11. Ganadería doble propósito
12. Ganadería de leche
13. Porcicultura
14. Avicultura

## 15. Piscicultura

Dado esto, el sector agropecuario se ha caracterizado por presentar resultados positivos históricamente para el Producto Interno Bruto (PIB) del país, destacando años como el 2017 en el cual el sector aportó 6,3% al PIB nacional, contando con ciclos de crecimientos determinados por la producción de café, el cual aportó un 9% del valor agregado agropecuario, la producción de caña de azúcar, con una participación de 3%, mientras que el resto de la actividad agrícola mantuvo una participación del 49% y presentó un crecimiento promedio de 2,6% desde el año 2000 (Banco de la República, 2019).

### 1.1.2. CAFICULTURA EN COLOMBIA

La Federación Nacional de Cafeteros afirma que en 1730 jesuitas trajeron semillas del grano de café a la Nueva Granada pero existen diferentes versiones respecto al tema, Serpa (1964) afirma que “el cultivo comercial del café, se inició a principios del siglo XIX en Cúcuta y Salazar de las Palmas (departamento del Norte de Santander); don Diego Monsalve, no obstante, con documentos muy veraces, sostiene que hacia 1760 el café ya se cultivaba en Santa Marta, Riohacha y Muzo; Hernández Mesa, por su parte, sostiene que las primeras plantas de café fueron traídas por los jesuitas, de la Guayana Holandesa, al Orinoco (1723) y de allí pasó el cultivo a Popayán en 1732.”

Según el Manual de Cafeteros Colombiano (1958), expone que lo que hoy es Norte de Santander fue el primer lugar donde el café se cultivó a escala comercial en el año 1760 y fue desde allí donde se empezó la propagación de plantaciones comerciales en diferentes municipios de Colombia, permitiendo que en 1835 se exportarán los primeros sacos producidos en la zona oriental desde la aduana de Cúcuta y en 1870 la producción había pasado de 60.000 sacos a más de 600.000 siendo el café el principal producto de exportación por el que Colombia recibía divisas (Café de Colombia, s.f). Todo esto dio un importante hito histórico en el origen a lo que ha sido la agroindustria rural principalmente por los ingresos y empleo a miles de campesinos.

En 1927 nace la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC), con el fin de representar nacional e internacionalmente los caficultores colombianos con presencia en todas las zonas rurales donde se produce el café, su eje central es el productor y la familia buscando un negocio sostenible que fortalezca el tejido social y el café siga siendo reconocido a nivel mundial, la federación actualmente representa 540 mil familias cafeteras en todo el territorio (Paisaje Cultural Cafetero, 2017). Durante el siglo XX, el café se consolidó como el principal producto de exportación del país, representando niveles cercanos al 80% de las exportaciones colombianas dando una tasa de crecimiento promedio anual de la economía de 5,5 % (Tirado et al., 2017).

En 1938 se da la creación del Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFE) con los objetivos principales de la transformación de la caficultura en Colombia, el favorecimiento del pequeño caficultor, la conservación de recursos renovables, el mejoramiento de la calidad del grano, la eficiencia en los procesos, entre otros. A través de



todo esto ha logrado generar campañas de conservación en todo el ámbito natural y uno de los logros más importantes en el ámbito nacional e internacional, está el desarrollo de la Variedad Colombia, Variedad Castillo y en el año 2016 se patentó la Variedad Cenicafé (Tirado et al., 2017).

Para el año 2011 el Comité de Patrimonio Mundial de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), inscribió en la lista del patrimonio mundial al Paisaje Cultural Cafetero el cual se conforma en su zona principal por áreas específicas de 47 municipios y 411 veredas y en el área de amortiguación, 4 municipios y 447 veredas de los departamentos de Caldas, Quindío, Risaralda y Valle del Cauca, en los cuales se han desarrollado representativas zonas de producción de café (Paisaje Cultural Cafetero, 2017).

Es por esto que Colombia se ha caracterizado a nivel mundial por ser un país productor y exportador de café, según la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia existen alrededor de 684 mil fincas dedicadas al cultivo de café con un total de 931.746 hectáreas sembradas en todo el territorio colombiano, esta economía cafetera se ha caracterizado por tener un alto grado de heterogeneidad que es determinado por diferencias en el tamaño y propiedad de la tierra, oferta ambiental, adopción de tecnologías, entre otras que caracteriza a los caficultores en tres tipos de economías:

1. Economía Cafetera Minifundista: Se caracterizan por que los tamaños de los predios son bajos teniendo alrededor de 0,75 hectáreas sembradas de café, son sistemas de producción con bajos niveles de tecnificación y con un uso intensivo de mano de obra familiar cuyo fin principal es generar un ingreso de subsistencia para la familia, el proceso del beneficio del café se realiza de forma tradicional.
2. Economía Cafetera Campesina: Se caracteriza por que las hectáreas sembradas de café son un poco más altas con un promedio de 3 hectáreas en producción que la de los cafeteros minifundistas, requieren contratación de mano de obra en épocas de cosecha, la producción de café es de excelente calidad y la implementación de prácticas sostenibles facilitan la producción de cafés especiales, en el proceso de secado prima el uso de energía solar combinado con secado mecánico en el cual se emplean combustibles de carbón, cisco de café, diésel y ACPM
3. Economía Cafetera Empresarial: Se caracteriza por que son predios con alrededor de 25 o más hectáreas sembradas en café, los caficultores de esta economía son los principales generadores de empleo rural con gran demanda de mano de obra externa y se distingue por un uso intensivo de los factores de producción, el uso de equipos mecanizado aportan a la eficiencia de las labores como la aspersión motorizada, secados mecánicos, entre otras.

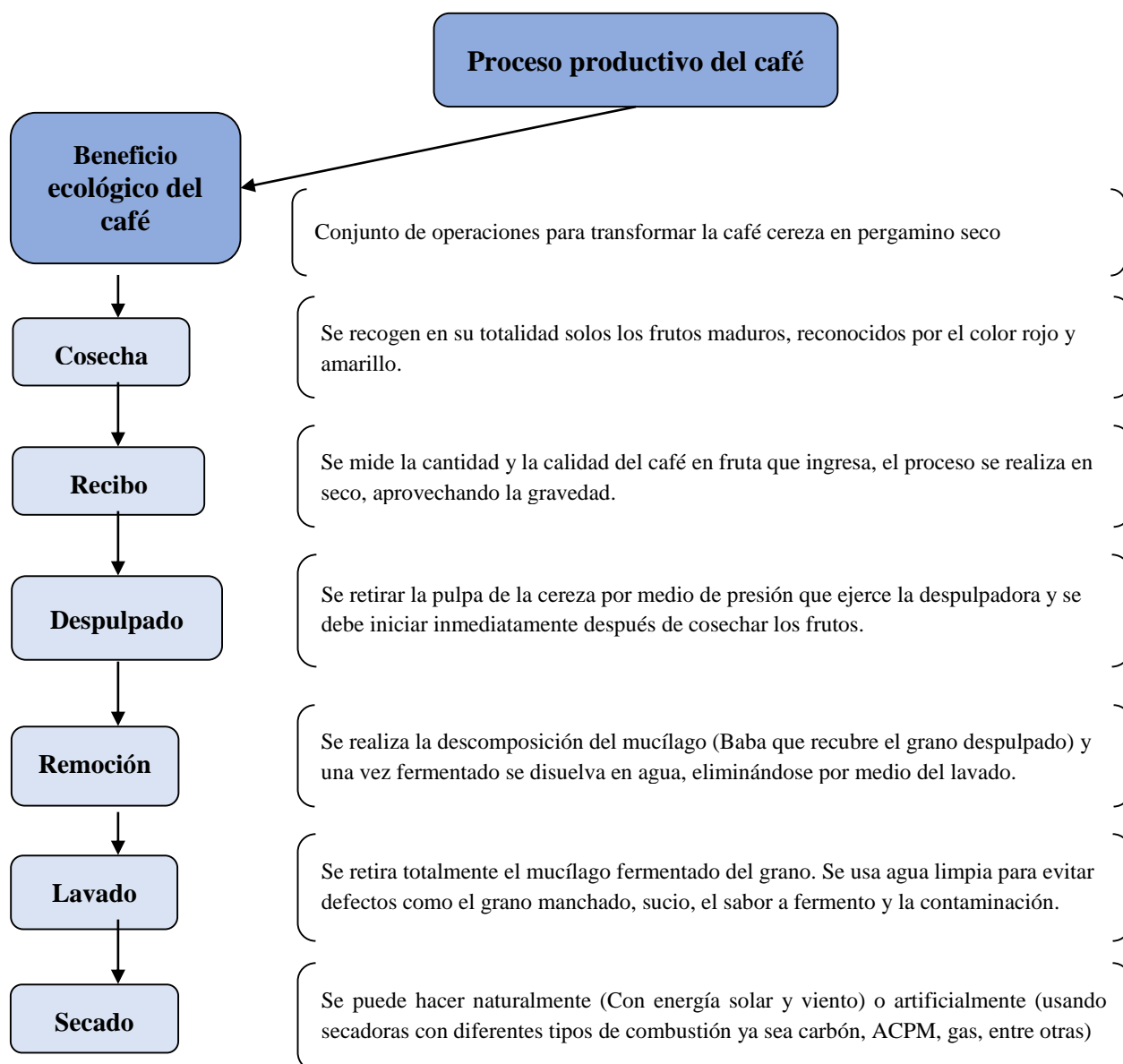
Debido a la eficaz organización que se da mediante la Federación Nacional de Cafeteros es que Colombia se ha mantenido en un nivel de exportación distinguido a nivel mundial, lo cual para el año 2019 se reconoció como un motor de crecimiento, ya que se lograron ingresos por 7,2 billones de pesos en la economía cafetera colombiana con la producción de 14,8

millones de sacos de 60 kilos de café verde, esto se dio principalmente por la renovación de los cafetales, ya que los árboles nuevos son más productivos que los que ya cumplieron el ciclo de alta productividad y el incremento de la moneda estadounidense ubicándose en la barrera de los 3.500 pesos (Portafolio, 2020).

### **1.1.3. PROCESOS DEL CAFÉ**

Las características de calidad del café de Colombia se originan principalmente en la finca y esto está influenciado por la variedad sembrada, que para lograr mantener la calidad del café de Colombia alta se deben cultivar variedades de café arábica, los comportamientos ambientales (suelos, agua, aire, flora y fauna), los cuidados agronómicos y fitosanitarios del cultivo, y por último los controles adecuados en los procesos de cosecha y postcosecha que deben ser realizados por los caficultores del país (Puerta, 2006).

Para el proceso productivo del café (*Figura 1*) es importante trabajar con anterioridad la semilla, lo que requiere la construcción del almácigo cuya finalidad es el desarrollo adecuado y la selección de las plántulas para el establecimiento del cultivo de café, posterior a esto se hace la preparación del terreno y se determina el sistema de siembra y trazo para la adecuada disposición de las semillas. El sombrío para los cafetales debe disponerse según las condiciones climáticas, tipo de suelo y pendiente del terreno donde se haya sembrado el café, la fertilización para el cultivo del café está enmarcada dentro de lo que se conoce como agricultura sostenible igualmente para el control de plagas se maneja controles ya sean biológicos, culturales, legal, mecánico, natural y/o químico, posterior a esto se realiza el beneficio ecológico del café para la obtención del grano (Federación Nacional de Cafeteros, s.f).



**Figura 1.** Proceso productivo del Café.

Fuentes: Guía ambiental para el sector cafetero (s.f)-Cenicafé (2016). Elaboración Propia.

La generación de los subproductos o residuos es inevitable en los sectores industriales, la industria del café se caracteriza al ser como lo explica López (2014) la segunda mercancía más comercializada del mundo, la cual genera gran cantidad de subproductos durante el procesamiento de la cereza hasta la obtención de la bebida. Estos procesos de biodegradación de los residuos representan un alto riesgo para la flora y fauna presente en el ecosistema puesto que se requieren tiempos muy largos y gran demanda en las cantidades de oxígeno para la degradación total de los mismos (Wong et al., 2013).

Los principales subproductos en el beneficio del café son la pulpa y el mucílago, estos adherido a los granos recién despulpados representan el 61 % de la materia fresca de la cereza y son la principal fuente de los materiales contaminantes en cuencas y terrenos agrícolas

(Hernández et al., 2015), la pulpa de café es considerada como el residuo sólido de mayor volumen (Meza, 1994 citado en Román, 2013), pues en su base seca corresponde alrededor del 29% del peso total del fruto, generalmente estos desechos son extendidos sobre el suelo de los terrenos cafetaleros o sobre otros cultivos para cumplir la función de abonos orgánicos, sin embargo se puede producir lixiviados, taponamiento de los poros del suelo, exceso de nutrientes y toxicidad (Granados, 2004).

Su grado de contaminación ambiental es mayor si no se elimina con un pretratamiento adecuado (Murthy et al., 2012). La degradación de estos residuos requiere de semanas a meses de la acción microbiana nativa para su descomposición parcial, por lo que puede acumularse e incrementar los problemas de contaminación en el ecosistema (Wong et al., 2013), con mayor intervención en los acuáticos dado a las grandes proporciones de aguas residuales que son descargadas en los ríos y quebradas las cuales presentan propiedades físico-químicas alteradas con presencia de sustancias orgánicas e inorgánicas que durante su descomposición producen olores y sabores desagradables, incremento en los contenidos de sólidos sedimentados al igual que el de la población de microorganismos que pueden reducir la demanda bioquímica de oxígeno interfiriendo en la flora y fauna acuática, hasta el punto de extinguirlos (Mora Urpí, 1977 citado en Román, 2013).

Actualmente se ha empezado a adoptar métodos de utilización de estos subproductos, como materia prima en la producción de concentrados para las industrias porcícolas y ganaderas, en preparación de bebidas, vinagre, biogás, cafeína, pectinas, enzimas pépticas, proteínas y abonos (Suárez, 2012). Para el manejo de estos subproductos La Federación Nacional de Cafeteros busca generar un mínimo impacto ambiental de la pulpa y el mucílago. Para la pulpa se considera el transporte sin agua a un sitio de deposición y descomposición, que puede ser una fosa o una cama de un lombricultivo, también puede reciclarse y usarse en el almácigo, como complemento nutricional o como mejorador del suelo. Y el mucílago se usa para enriquecer la pulpa o el lombricultivo y en algunos casos, como alimento de animales domésticos. El agua de lavado se recircular en el proceso, tratando de generar poca presión en el recurso hídrico.

#### **1.1.4. PULPA DE CAFÉ**

Según Bressani (1978), La pulpa de café es el primer producto que se obtiene en el método usado para el procesamiento del grano de café, y representa, en base seca, alrededor del 29% del peso del fruto entero. La composición química proximal de la pulpa de café (*Tabla 1*) corresponde a la pulpa fresca, pulpa deshidratada y una pulpa almacenada por diferentes días después de haber sido obtenida, igualmente se consigna el contenido promedio de minerales en la fracción de cenizas de la pulpa de café (*Tabla 2*).

**Tabla 1.** Análisis bromatológico de la pulpa de café.

<b>Composición Bromatológica</b>	<b>Fresca (%)</b>	<b>Deshidratada (%)</b>	<b>Fermentada naturalmente y deshidratada (%)</b>
Humedad	76,6	12,6	7,9
Materia seca	23,3	87,4	92,1
Extracto etéreo	0,48	2,5	2,6
Fibra cruda	3,4	21,0	20,8
Proteína cruda N x 6.25	2,1	11,2	10,7
Cenizas	1,5	8,3	8,8
Extracto libre de Nitrógeno	15,8	44,4	49,2

Fuente: Elías (1978).

**Tabla 2.** Contenido de cenizas y de minerales en la pulpa de café.

<b>Compuesto</b>	<b>Contenido</b>
Ceniza, g%	8,3
Ca, mg%	554
P, mg%	116
Fe, mg%	15
Na, mg%	100
K, mg%	1765
Mg	Trazas
Zn, ppm	4
Cu, ppm	5
Mn, ppm	6,25
B, ppm	26

Fuente: Elías (1978).

En Colombia el promedio de la producción de pulpa de café fue de 2,25 ton/ha-año, por cada millón de sacos de 60 kg de café almendra que Colombia exporta, se generan 162.900 toneladas de pulpa fresca, que si no se utilizan adecuadamente producirían una contaminación equivalente a la generada durante un año, en excretas y orina, por una población de 868.736 habitantes (Rodríguez y Zambrano, 2010).

Actualmente se ha trabajado con la pulpa de café buscando que genere un mínimo impacto ambiental. Según Suárez (2012) la pulpa de café puede reemplazar hasta en un 20 % los concentrados para la alimentación del ganado lechero, donde se estima un ahorro del 30% en los costos de nutrición. En cerdos se puede suplementar con pulpa deshidratada hasta en un 16%. Jiménez et al., (2017) afirman que pulpa de café puede extraer compuestos bioactivos con posibles aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética, permitiendo de esta manera aprovechar estos residuos, disminuir los efectos negativos sobre el medio ambiente y mejorar la rentabilidad de esta agrocadena, por último, Rodríguez y Zambrano (2010) afirman que a esta se le puede dar utilización como combustible directo, producción de biogás y de bioetanol.

## 1.2. BIOCARBÓN

### 1.2.1. ¿QUÉ ES EL BIOCARBÓN?

El biocarbón, conocido en inglés como *biocarbon*, es el producto de la descomposición térmica de materiales orgánicos (biomasa) en un recipiente cerrado con limitada provisión de oxígeno (proceso que se lleva a cabo en la pirólisis) a temperaturas inferiores a los 700°C (Escalante et al., 2016), sin embargo su definición ha sido tema de discusión en distintas investigaciones y por varios autores quienes desde sus diferentes análisis han cuestionado las disimilitudes entre el carbón vegetal y el biocarbón (Aker, 2014). Es por ello que la palabra biocarbón se considera contemporánea y ha sido destinada para hacer referencia al carbón vegetal con utilidad específica en el manejo de suelos y secuestro de carbono (Karaosmanoglu et al., 2000 y Derimbas, 2004 citados en Aker, 2014). Difiere del carbón vegetal por la implementación de éste para fines energéticos, de igual manera se diferencia de las cenizas generadas por la quema a fuego abierto de biomasa debido a que ésta contiene minerales de calcio, magnesio y carbonatos inorgánicos (Guerra, 2014).

La definición otorgada al biocarbón por medio de un acuerdo por parte del comité asesor de International Biocarbon Initiative (IBI) es la siguiente:

Biocarbón es carbón vegetal de partículas finas, alto en carbono orgánico y largamente resistente a la descomposición. Es producido a partir de la pirólisis de plantas y residuos de materias primas. Como una enmienda al suelo, el biocarbón crea una reserva recalcitrante de carbono en el suelo que es carbón-negativo, sirviendo como un retiro neto de dióxido de carbono atmosférico almacenado en stocks de carbono de suelos altamente recalcitrantes. La capacidad mejorada de retención de nutrientes de los suelos enmendados de biocarbón no solo reducen la cantidad total de requerimiento de fertilizantes, también el impacto de las tierras de cultivo en el clima y el ambiente (Joseph et al., 2009, citado en Aker, 2014).

Tener un concepto claro de lo que es el biocarbón desde el punto de vista químico es aún más complejo, dado a las distintas materias primas orgánicas y la gran variedad de condiciones de carbonización (temperatura de pirólisis, velocidad de reacción, tiempo de secado, etc.) que son implementadas en su producción. Así mismo la estructura adquirida por el biocarbón

puede diferenciarse, desde conformaciones tipo grafito hasta la formación de anillo aromático por alto contenido de Carbono el cual está presente en considerables cantidades en la materia orgánica viva (Harris, 1999 citado en Lehmann y Joseph, 2015). En pocas palabras, el proceso de producción del biocarbón y el uso final destinado para el mismo determinan su clasificación y terminología (Guerra, 2014).

### **Composición físico-química del biocarbón**

Según varios autores, la composición química de los biocarbones es considerada similar a la del carbón vegetal que es producido y destinado para combustibles, diferenciados a partir del uso para el que fueron elaborados (Schahczenski, 2010 citado en Lehmann y Joseph, 2015). El uso de diferentes tipos de biomasa permite la variación en cuanto a la composición del biocarbón en los que se hacen presentes los macro y micronutrientes que provienen de la materia prima original, a pesar de ello el carbono sigue siendo el componente principal altamente recalcitrante en los suelos que permite la captura de carbono y coopera con la reducción de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (Guerra, 2014). Dentro de sus elementos primarios se encuentra el oxígeno (O), carbono (C), hidrógeno (H) y nitrógeno (N), siendo el último es más sensible con respecto al calor generado durante el proceso de producción de biocarbón a elevadas temperaturas siendo liberado como óxido de nitrógeno como amoníaco, por lo que se espera que el contenido de (N) en el biocarbón sea bajo (Shenbagavalli et al., 2012; McLaughlin et al., 2009 citados en Aker, 2014). Asimismo, hacen presencia otros elementos como metales pesados, cationes básicos y compuestos orgánicos como los poli-aromáticos condensados que le conceden estabilidad biológica y química al biocarbón de manera prolongada permitiéndole tolerar la oxidación química y biológica que favorece su permanencia durante cientos a miles de años en el suelo (Lehmann y Joseph, 2015). Por su parte, la formación de contaminantes como los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs) dependerá del proceso mismo de pirólisis y del material utilizado (Guerra, 2014).

En cuanto a sus características físicas el biocarbón se conforma como un sólido de color negro presentando una superficie confusa y desordenada debido a las partículas de distintos tamaños que lo compone dado a las características de la materia prima orgánica, al tiempo y la temperatura de pirólisis a la que estuvo expuesta. La materia prima original provee los macroporos del biocarbón los cuales posibilitan el transporte de sales y moléculas concentradas (Martínez et al., 2006 citado en Escalante et al., 2016); por su parte, los microporos se forman a partir del aumento de temperatura durante la pirólisis y cumplen con la función de adsorber los compuestos líquidos, sólidos y gaseosos (Verheijen et al., 2009 citado en Escalante et al., 2016). El material volátil se genera en la fase gaseosa durante el calentamiento del biocarbón, aprovisiona al suelo de carbón soluble que puede conllevar a la deficiencia a corto plazo de nutrientes por la competencia de nitrógeno disponible entre la planta y la actividad microbiana, lo que no favorece en las mejoras del suelo a largo plazo (McLaughlin et al., 2009 citado en Escalante et al., 2016). Se debe tener presente las alteraciones paulatinas que sufre el biocarbón en el suelo, su oxidación conlleva a cambios en su composición química y estructural generando modificaciones no solo en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, sino que también repercute en las cualidades del suelo (Cheng y Lehmann, 2009 citado en Escalante et al., 2016).

### **Origen del biocarbón.**

El hallazgo de tierras negras de los indios amazónicos que se establecieron en Brasil, hoy mejor conocidas como suelos antropológicos de “Terra preta de Indio”, permitieron su descripción como suelos oscuros y fértiles de los cuales se desconocía su origen (Woods, 2004 citado en Escalante et al., 2016). Por su parte Falcao (2012) estimó que éstos suelos habían sido desarrollados a través del depósito de restos de esqueletos de pescados y materiales orgánicos que habían pasado por proceso de combustión como lo era la quema de praderas o bosques por incendios casuales o intencionales para la limpieza y adecuación de terrenos para el establecimiento de cultivos, prácticas que realizaban los indios que de cierta manera transformaban los suelos y los enriquecían de nutrientes (Woods y Glaser, 2004 citado en Escalante et al., 2016). Se cree que el comienzo de la formación de Terra Preta de Indio fue dado hacia finales del periodo precolombino en la Amazonía del Brasil (Neves et al., 2003), también se han registrado hallazgos según Liang et al. (2006) citado en (Aker, 2014) desde la Edad Media en el norte de Europa comprendiendo los países de Dinamarca, Holanda, Bélgica y el noreste de Alemania. De igual forma se han encontrado suelos con características similares en las grandes llanuras de Estados Unidos, en México, Australia, Japón y en el continente africano. Por sus drásticas transformaciones la FAO incluye estos suelos en la clasificación como Antrosoles, definidos como aquellos que han sido modificados de manera drástica por medio de las actividades humanas (Aker, 2014).

Los estudios realizados a estos suelos permitieron establecer la presencia de notables propiedades como altos contenidos de materia orgánica, carbono y humedad, elevada disponibilidad de nutrientes y una mayor capacidad de intercambio catiónico y actividad microbológica (Lehmann y Joseph, 2009). Es así como surge la propuesta de implementar una tecnología que fuera similar, donde el carbón proveniente de la quema de desechos vegetales pudiese ser incrustado en el suelo que pudiese capturar de forma permanente el exceso de CO<sub>2</sub> contribuyendo a la mitigación y reducción de los efectos del cambio climático, esto generó mayor interés para emprender estudios sobre el tema (Escalante et al., 2016). Aunque en algunas regiones el estudio y la investigación científica sobre el biocarbón ha estado presente por un tiempo prolongado, a nivel global se considera como un avance reciente evidenciado en la baja presencia de literatura frente al asunto (Lehmann y Joseph, 2015).

### **1.2.2. FUENTES DE PRODUCCIÓN**

El concepto de biomasa se define como aquella porción biodegradable de los productos, desechos y residuos que tienen un origen biológico que surgen de actividades agropecuarias, industriales, municipales de la silvicultura, esto indica que los recursos biomásicos procederán de diversas y heterogéneas fuentes (Herguedas et al., 2012). Según la FAO (La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) las actividades agropecuarias tienen una considerable inferencia en temas de contaminación ambiental y la salud humana, los residuos generados por dichas actividades como lo son el amoniaco, fertilizantes minerales, residuos de cultivos o biomasa son los responsables del 23% del total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) cada año a nivel mundial (Nadal, 2019). Generalmente estos residuos presentan un manejo precario, inadecuado o simplemente no

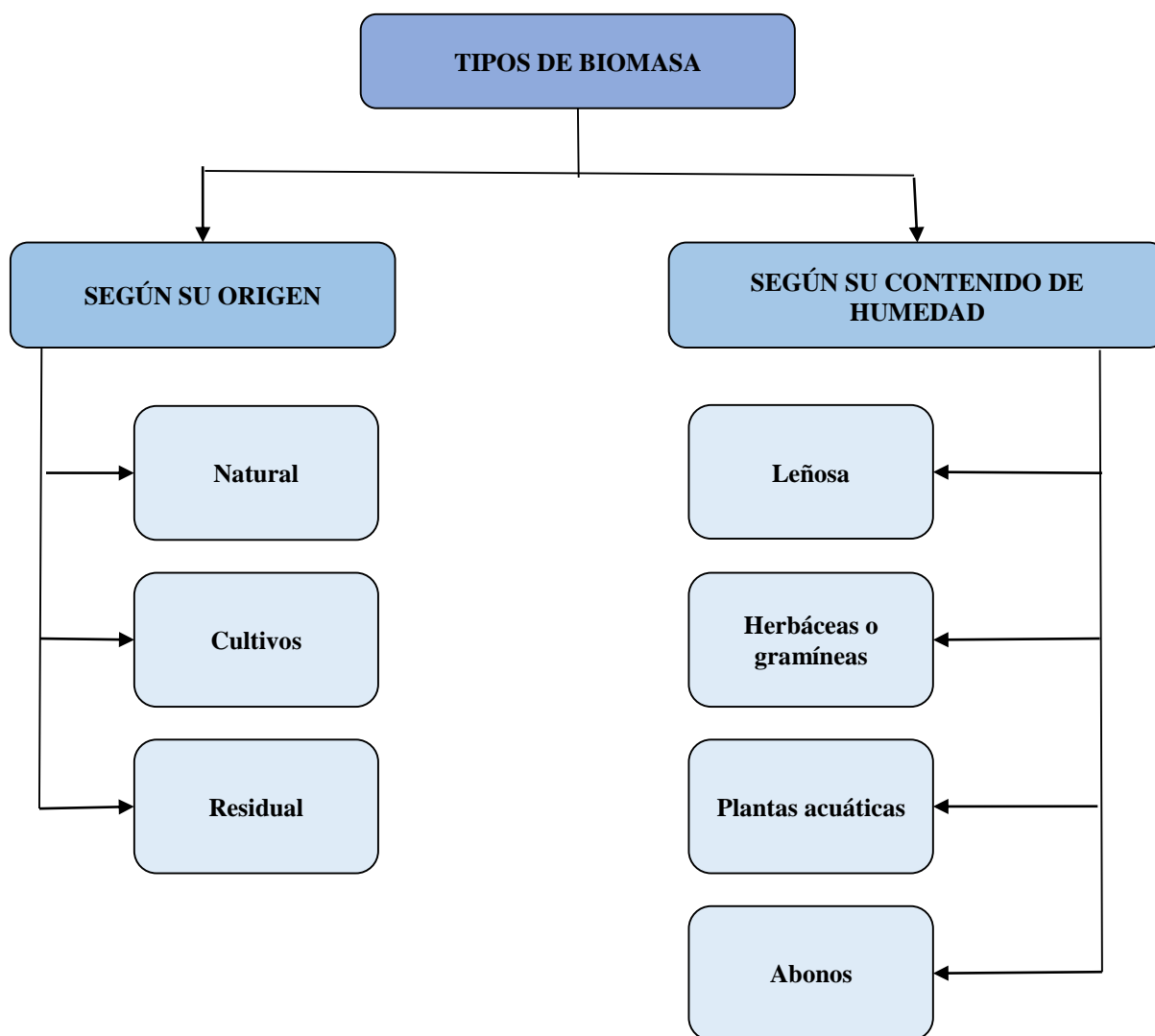


son tenidos en cuenta, en el caso de los subproductos forestales y agrícolas son utilizados como abonos orgánicos o como biocombustibles, es uso como mantillo para retener la fertilidad del suelo es implementado en los sistemas agroforestales de la Amazonía y en las circunstancias donde los residuos de cultivos son abundantes y ocupan grandes extensiones la alternativa implementada es su incineración. La producción de biocarbón se acoge como oportunidad de aprovechamiento y uso de la biomasa residual como materia prima para elaborar un producto de mayor valor (Guerra, 2014).

Hoy por hoy la biomasa está adquiriendo importancia y protagonismo como fuente renovable que está contribuyendo a la sostenibilidad, la economía y la seguridad energética de un país o una región (Azri Sukiran et al., 2011 citado en Guerra, 2014). En aquellos países en vía de desarrollo y donde prevalece el sector primario (producción agrícola) puede llegar a ser de gran beneficio tanto económico, como social y ambiental el aprovechamiento de los residuos originados de las cosechas no solo implementados en el sector energético sino también en otros usos, como el manejo de los suelos. Los subproductos de los cultivos no son la única materia prima para la producción de biocarbón, son muchas las biomásas que cuentan con las características y el potencial para ser transformadas, dependerán de la selección del tipo de biomasa y de los procesos de producción llevados a cabo para obtener las propiedades deseadas (Guerra, 2014). Según la teoría se podría hacer uso de cualquier tipo de biomasa (residuos agrícolas, forestales, industriales o domésticos), no obstante, no todos los residuos o subproductos son apropiados para producir biocarbón. Para que la elección de la materia prima sea viable es importante conocer de antemano que dicho material no está compitiendo con otros usos asignados, y si éstos generan o no productos con un valor económico mayor que del biocarbón (Escalante et al., 2016).

### **Fuentes y tipos de biomasa**

Existen numerosas fuentes de biomasa, cada una con un potencial de uso distinto que varía según su proceso de transformación, sus características físico-químicas, el lugar donde se encuentren y las necesidades de producción. Éstas variables permiten clasificar los tipos de biomasa según su origen y contenido de humedad como se muestra en Herguedas & Taranco (2012) y en Urien Pinedo (2013), cabe aclarar que existen diversas clasificaciones de los tipos de biomasa, para fines de este trabajo se hará énfasis en las que se representan en la *Figura 2*.



**Figura 2.** Clasificación y tipos de biomasa.

Fuente: Herguedas y Taranco (2012); Urien Pinedo (2013). Elaboración propia.

A partir del origen de la biomasa se puede clasificar en:

- **Natural:** Es aquella producida de manera instintiva en la naturaleza, en aquellos ecosistemas donde no se ha manifestado la intervención humana. Su aprovechamiento no es recurrente debido a los costos y baja rentabilidad por procesos de obtención y transporte. Sin embargo, es la principal fuente energética de localidades pequeñas y países en desarrollo (Herguedas y Taranco 2012).
- **Cultivos:** Son grandes plantaciones destinadas a fines energéticos como cultivos forestales de crecimiento rápido y bajo mantenimiento como pastos, arbustos que pueden ser podados varias veces durante su etapa de crecimiento, cultivos de plantas

herbáceas o gramíneas cultivadas en tierras de bajo valor productivo, seleccionados por la cantidad de biomasa generada más que por su calidad (Herguedas y Taranco 2012; Urien Pinedo, 2013). Muchos cultivos agrícolas también proporcionan numerosas materias primas orgánicas provenientes de la caña de azúcar, maíz, sorgo, trigo y café; algunas plantas oleaginosas como palma de aceite, girasol o soya, algunas plantas acuáticas también son fuentes de producción como el jacinto de agua o las algas (BUN-CA, 2002).

- **Residual:** Se trata de biomásas que provienen de los residuos generados por la actividad humana como pueden ser forestales, agropecuarios, industriales y urbanos. Este tipo de biomasa cuenta con la ventaja de no interponerse en la producción de alimentos, por el contrario, puede cooperar a la rentabilidad de la agricultura (Urien Pinedo, 2013).

Herguedas y Taranco (2012) argumentan que este tipo de biomásas además se clasifican en secas y húmedas, o en sólidas y líquidas. A continuación, se nombran algunas materias primas, también citadas en (Lehmann y Joseph, 2009); (Brick, 2010 citado en Escalante et al., 2016).

- **Residuos de actividades agrícolas, forestales y de jardinería:** Pajas de cereales, zuros de maíz, excedentes agrícolas, hojas, ramas, corteza, cáscaras (arroz, café, naranja, avellana, entre otros).
- **Residuos de industrias agrícolas, pecuarias y forestales:** Producción de aceite de oliva, aceite de orujo de oliva, industria vinícola y alcoholera, producción de frutos secos, recortes de madera, aserrín, excremento.
- **Residuos agroindustriales:** industrias lácteas, papeleras, destilerías, almazaras, conserveras, etc.
- **Residuos urbanos:** Desperdicios orgánicos, papel, cartón, madera, lodos residuales (deben garantizar la ausencia de gérmenes nocivos para los cultivos de consumo humano o animal)

La clasificación en función del contenido de humedad se realiza teniendo en cuenta que éste es un factor determinante en el momento de seleccionar el proceso de conversión de mayor pertinencia. En el caso de la conversión bioquímica se requiere para aquellas biomásas con alto contenido de agua, mientras que la conversión termoquímica es la indicada para biomásas con bajo contenido de humedad (Urien Pinedo, 2013). A continuación, se establece el contenido de humedad<sup>1</sup> o agua<sup>2</sup> para cada grupo de biomásas:

- **Plantas leñosas:** Bajo contenido de humedad
- **Plantas herbáceas o gramíneas:**

---

<sup>1</sup> Se mide con relación al peso seco de la biomasa, es decir la relación entre el agua y la materia seca.

<sup>2</sup> Se refiere a la cantidad de agua que está contenida en la biomasa húmeda (masa fresca).

- Plantas herbáceas de gran contenido en agua
- Plantas herbáceas de bajo contenido en agua
- **Plantas acuáticas:** Elevado contenido de humedad.
- **Abonos:** Elevado contenido de agua.

### Características de la biomasa

Con el propósito de evaluar la factibilidad técnica y económica de los procesos de transformación de la biomasa en biocarbón, se hace indispensable tener en cuenta ciertos parámetros y condiciones que la caracterizan (Herguedas et al., 2012).

- **Composición química y física:** Las biomasas están conformadas por una sección orgánica, una inorgánica y agua. En el proceso de combustión, la parte orgánica es consumida por las altas temperaturas, mientras que la parte inorgánica influye en la labor de combustión formando cenizas o residuos sólidos. Se puede determinar la composición química de la biomasa original por medio de análisis de los elementos importantes (C, H, N, S y Cl), el oxígeno es determinado partiendo de las diferencias del peso total y la suma de los demás elementos junto con las cenizas.
- **Contenido de humedad (HR):** Es la relación entre la masa de agua que se encuentra contenida por kilogramo de materia seca. Si el valor contenido es cada vez menor el valor calorífico de la biomasa será mejor al igual que el proceso de combustión, debido a que se debe evaporar primero el agua cuando se quema la biomasa antes de que el calor esté disponible. Se recomienda un valor de HR inferior al 30% para los procesos de conversión energética.
- **Porcentaje de cenizas:** Se refiere a la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de materia prima. Es posible utilizar la ceniza cuando se conoce el porcentaje de generación y su composición formada por los cationes y aniones, los más comunes son el calcio, magnesio, fosfato, potasio, sulfato y silicato, un ejemplo de ello es la ceniza de cascarilla de arroz el cual es un aditivo en la mezcla de concreto o si bien para la elaboración de filtros de carbón activado (BUN-CA, 2002; Urien Pinedo, 2013).
- **Poder calorífico:** Se define como el contenido calórico en unidad de masa, por medio de éste parámetro se establece la energía que hay disponible en la biomasa. Se relaciona indirectamente con la humedad, debido a que un elevado porcentaje de humedad disminuye la eficiencia en la combustión de la biomasa, dado a que una fracción del calor liberado es usado para evaporar el agua mas no es aprovechado en la reducción química del material.
- **Densidad aparente:** Se asocia al peso por unidad de volumen de la materia prima en el estado físico que presente y bajo unas condiciones establecidas. Los materiales con baja densidad requieren de mayor volumen de almacenamiento y transporte, además

de presentar en algunas ocasiones problemas para fluir con gravedad complicando la combustión de la biomasa e incrementando los costos del proceso (BUN-CA, 2002).

### 1.2.3. MODO DE PRODUCCIÓN

La materia prima orgánica destinada a la elaboración de biocarbón puede ser modificada a través de tres procesos principales (Guerra, 2014):

- **Conversión bioquímica:** Es posible por medio de la actividad microbiológica en ausencia de oxígeno, como lo es la producción de etanol a partir de la fermentación alcohólica y la digestión anaerobia para la obtención de metano.
- **Conversión físico-química:** Se lleva a cabo por proceso mecánico de prensado y extracción que facilita la producción de aceites vegetales
- **Conversión termoquímica:** Es dada por la acción térmica como lo son la combustión en presencia de exceso de oxígeno, la gasificación que requiere limitadas cantidades de oxígeno y la pirólisis que es un proceso que no requiere de oxígeno.

Existen y se implementan una gran variedad de procesos asociados a la conversión termoquímica para la producción de combustibles y productos químicos a partir de recursos renovables. Los estudios de los procesos han sido rigurosos y se determina su división en subcategorías a partir de sus variables operacionales, los productos finales e intermedios que se obtienen difieren de cada proceso de conversión. La combustión es una de las subcategorías, por medio de esta la biomasa se transforma en gases calientes a temperaturas entre 800-1000°C, en presencia de oxígeno y con una humedad del material inferior al 50%. La gasificación es otro proceso utilizado para la oxidación parcial de la biomasa empleando aire, oxígeno o vapor de agua expuestas a temperaturas que varían entre los 800°C y 900°C, de esta forma se obtiene gas combustible para motores y turbinas, además de la producción de metanol (Urien Pinedo, 2013). Los procesos planteados en las metodologías de la mayoría de los estudios e investigaciones asociadas a la producción de biocarbón han sido direccionados hacia la implementación de pirólisis y en menor medida al uso de gasificación (Guerra, 2014).

El proceso de pirólisis, se define como la descomposición termoquímica de la materia orgánica en ausencia o bajo contenido de oxígeno, convirtiéndola en un sólido con alto porcentaje de carbono y material volátil (Brownsort, 2009 citado en Guerra, 2014). El biocarbón producido puede presentar aproximadamente la mitad del contenido total de carbono de la biomasa original, por su parte el material volátil puede pasar por un proceso parcial de condensación para la obtención de bio-oil que, junto con los gases no condensables como subproductos, pueden ser empleados como fuente de energía (Guerra, 2014). Para llevar a cabo el proceso de pirólisis se acude a equipos destinados para dicho fin, unos de los diseños más habituales consisten en un horno abierto que aprovecha la combustión a partir de leña para dar inicio a la carbonización, alcanzando un rendimiento bajo en el biocarbón producido (15-20%). Otro diseño utilizado con frecuencia son los hornos cerrados en los que

se tiene la posibilidad de trabajar de manera continua o por cargas, obteniendo productos de la pirólisis como los son sólidos, condensados y gases, las condiciones de su reacción determinarán el rendimiento y la composición de éstos (Pantoja, 2015).

Existen muchos procesos de pirólisis según Taylor y Mason (2010) citados en (Aker, 2014) que son ejecutados en la industria para la elaboración del biocarbón, algunas de ellas y las más comunes son:

- **Pirólisis lenta:** Se trata del tipo de tecnología más utilizado para la producción de biocarbón, la ausencia de oxígeno, velocidades de calentamiento lentas y rangos de temperatura bajos, entre 400°C y 600°C son algunas de sus características más representativas en su aplicación, éstas a su vez retardar el proceso y por lo que se podría tomar varias horas, al final se tendrán productos sólidos, líquidos y gases de los cuales su recuperación no será necesaria (Urien Pinedo, 2013; Brownsort, 2009 citado en Guerra, 2016; Taylor y Mason 2010 citado en Aker, 2014). Se incluye la carbonización dentro de este proceso por el aporte y enriquecimiento de carbono durante la pirólisis del carbón vegetal (Bridgewater, 2012 citado en Aker, 2014).
- **Pirólisis rápida:** En este proceso la ausencia de oxígeno continúa siendo un factor importante, sin embargo, su velocidad de calentamiento presenta una aceleración mayor y temperaturas superiores a 600°C. La previa preparación del material consiste en la reducción del mismo a partículas pequeñas, lo que conlleva a obtener como producto una considerable cantidad de compuestos volátiles condensados que podrán afectar los resultados y el desempeño del biocarbón en el uso como enmienda para el suelo, esto podría evidenciarse en la utilidad de ésta pirólisis con un perfil direccionado hacia la producción de energía a través de bioaceites (Urien Pinedo, 2013; Taylor y Mason 2010 citado en Aker, 2014; Brownsort, 2009 citado en Guerra, 2015).

#### 1.2.4. APLICACIÓN DEL BIOCARBÓN

##### Contribuciones edáficas

Las propiedades físicas, químicas y biológicas adquiridas por el biocarbón en su proceso de elaboración crean para éste un campo de aplicación bastante interesante y efectivo, que además son diferentes a los del carbón vegetal o charcoal, el cual es usado principalmente como una fuente energética (Guerra, 2014). Uno de los usos del biocarbón más abordados en la literatura está asociado al tema de la agricultura, en el cual el biocarbón es suministrado como enmienda para el suelo, es decir, un medio para la mejora de la productividad del mismo. Entre las principales utilidades para el agro está la mejora en la infiltración y retención del agua en el suelo, en la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el incremento del pH en suelos ácido, contribuye a la retención y al reciclaje de los nutrientes como Sodio (Na), Potasio (K), Calcio (Ca) y fósforo (P) principalmente, permitiendo su disponibilidad

para el debido aprovechamiento por parte de las plantas, proceso que no pueden llevar a cabo otros materiales orgánicos como lo son el compost, la hojarasca o el estiércol; el biocarbón permite fijar y mejorar el uso eficiente del nitrógeno y estimular el crecimiento microbiano (Lehmann et al., 2011 citado en Guerra, 2014); la retención o adsorción de compuestos químicos que pueden ser herbicidas, metales pesados, Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP's) y demás también es una utilidad importante que ofrece la implementación del biocarbón. La resistencia que presenta el biocarbón frente a la degradación microbiana permite que sus beneficios sobre el suelo tengan un efecto prolongado (Guerra, 2014).

La facultad de mejora de suelos agrícolas que ofrece el biocarbón no solo genera el incremento de su productividad, sino que también se evidencia una reducción en el requerimiento de fertilizantes y en los impactos que estos generan sobre el ambiente y la salud humana (Aker, 2014), sin embargo, en Guerra (2015) se sugiere el acompañamiento del biocarbón con otra enmienda con el propósito de incrementar el rendimiento de los cultivos. La gallinaza puede considerarse como una alternativa de acompañante, aunque puede producir impactos ambientales y a la salud humana no son tan nocivos como los generados por los fertilizantes sintéticos. Este abono a pesar de perder nitrógeno por lixiviación y volatilización de amoníaco, cuenta con considerables cantidades de N, P, K y micronutrientes que según Steiner *et al.* (2010) citado en (Aker, 2014) al ser adicionada la mezcla de biocarbón-gallinaza se minimiza considerablemente las pérdidas de nutrientes y se hace efectiva su liberación en las plantas. Es por ello que el biocarbón se estima como un producto de interés en el momento de preparar o disponer en los suelos abonos con altos contenidos de Nitrógeno (Aker, 2014).

Bajo la discusión de varios autores, así como las funciones del suelo pueden verse mejoradas por la adición de biocarbón, de igual manera puede influir en los diferentes procesos que en él se llevan a cabo (Escalante *et al.*, 2016). Es así como Downie *et al.* (2009) citado en Escalante *et al.* (2016) manifiesta que las propiedades físicas del biocarbón se pueden ver alteradas debido a su incorporación al suelo, dentro de estos atributos se encuentra la estructura, la textura, el área superficial total, el tamaño de los poros y la densidad aparente que al sufrir modificaciones se puede ver reflejados sus efectos en la retención de humedad, en el crecimiento de las plantas, dificultades en el proceso de laboreo del suelo y problemas de aireación en el suelo ocasionado por pequeñas partículas sueltas del biocarbón que pueden bloquear parcial o totalmente los poros del suelo, lo que alteraría su estructura y su capacidad de infiltración.

Otras evidencias han demostrado que el biocarbón es un portador de microorganismos, por lo que se le asocia al incremento de la población de hongos micorrízicos (relación simbiótica con las raíces de las plantas vasculares) y sus niveles de infección por la bacteria *Rhizobium*, por éstas características el biocarbón es utilizado e incorporado en los procesos de biorremediación de suelos (Amonnette, 2009 citado en Escalante *et al.*, 2016). La exposición prolongada del biocarbón en ambientes con contaminantes potenciales como los HAP's, metales pesados, compuestos clorinados, entre otros; pueden conllevar consecuencias para la salud y seguridad de los seres humanos, por lo que se recomienda realizar pruebas a la tecnología de producción y uso del biocarbón antes de ser aplicado en suelos con presencia de estos contaminantes (Escalante *et al.*, 2016).

## Captura de Carbono Atmosférico (CO<sub>2</sub>)

Se ha podido evidenciar el potencial que tiene el biocarbón para retener y fijar carbono atmosférico en el suelo de manera prolongada evitando que éste pueda ser liberado a la atmósfera como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), esto se debe a la característica recalcitrante que adquiere el biocarbón durante su producción (Lehmann y Joseph, 2009 citados en Guerra, 2014), donde la alrededor del 50% del total de carbón que contiene la biomasa original es retenido y entre el 20-50 % del carbono de la masa logra dicha característica durante la pirólisis, generando resistencia a la oxidación química y biológica, por lo tanto su proceso de degradación tarda más tiempo en llevarse a cabo (Escalante *et al.*, 2016). Esto le permite al biocarbón debutar como una nueva propuesta para la mitigación del Cambio Climático (Guerra, 2014).

La agricultura es uno de los campos que más aportes realiza a la atmósfera en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), esto se debe mayormente al uso desmedido de fertilizantes, las prácticas agrícolas implementadas y los procesos de mineralización de materia orgánica por parte de los microorganismos del suelo (Martínez *et al.*, 2008 citado en Escalante *et al.*, 2016). Según FAO y OCDE (2019), Colombia es el tercer país de América Latina con altos índices de GEI debido a su actividad agropecuaria, la cual realiza un aporte del 38%, donde el 58% corresponde al aporte de cultivos y el 49,2% es aportado por la ganadería. De igual manera la actividad forestal tiene peso sobre las emisiones a causa de la deforestación y los incendios provocados, para Colombia la cifra en el 2019 se establecía en un 33% de GEI aportado (Revista Semana, 2020). Para implementar el biocarbón como alternativa de manejo de los impactos generados por alguna de las actividades ya mencionadas se debe conocer el potencial del biocarbón para retener el carbono contenido en el suelo por un largo tiempo, esto se logra a partir del análisis de ciclo de vida del biocarbón lo que demuestra la reducción de emisiones de GEI y que éstas varían según el tipo de materia prima utilizada y del sistema de pirólisis utilizado para producirlo (De Gryze *et al.*, 2010 citado en Escalante *et al.*, 2016).

## Absorción de toxinas en alimentación animal

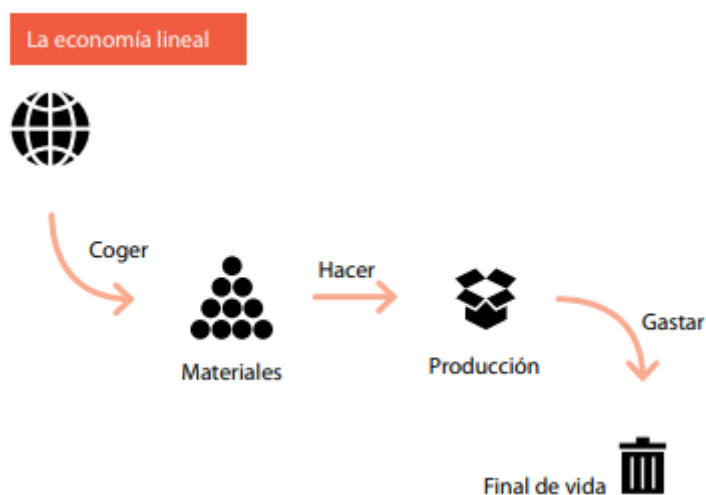
En la investigación realizada por Urien Pinedo (2013) sobre la *Obtención de biocarbones y biocombustible mediante pirólisis de biomasa residual* se llevó a cabo la implementación del biocarbón resultante en la alimentación animal. La biomasa utilizada como materia prima para la producción de estos biocarbones con fines comerciales debe contener un alto porcentaje de carbono que generalmente se encuentran en residuos lignocelulósicos como lo son la madera, cáscaras, huesos de frutas, entre otros. El uso asignado en este estudio se remite a la adsorción de toxinas que se encuentren en el aparato digestivo del animal, esto es dado debido a que se presentan fuertes interacciones entre la superficie del carbón y la especie que se pretende retener, la capacidad de adsorción por parte del biocarbón dependerá tanto de su superficie específica como del tamaño de sus poros. Como resultado de la investigación de Urien Pinedo, el biocarbón producido a base de abeto (especie arbórea nativa de Europa) cuenta con las características texturales muy similares a la de los productos comerciales que se encuentran en el mercado por lo que es el más apto para ser implementado como corrector de piensos (alimento para animales).



### 1.3. INCORPORACIÓN DEL BIOCARBÓN EN LA ECONOMÍA CIRCULAR

#### 1.3.1. LA ECONOMÍA CIRCULAR

Según la fundación Ellen MacArthur (2012) la economía lineal actual basada en «tomar, hacer, desechar» considera grandes cantidades de materiales y energía que además de tener bajos costos también sean de fácil acceso, convirtiéndose en el elemento fundamental del desarrollo industrial y el responsable de generar un nivel de crecimiento sin precedentes. El progreso de este sistema económico se ha llevado a un ritmo acelerado en los últimos 40 años, evidenciado en la disminución de la capacidad de carga del planeta considerada como la proporción máxima de población (incluyendo recursos disponibles, demandas y dinámicas) que puede sustentar la tierra, en el año 1987 la sobrecarga tuvo lugar el 19 de diciembre, para el actual año 2020 se tiene estimado que se dé el día 29 de julio. Si no se indagan las formas de cambiar el modelo lineal de producción y consumo vigente la disponibilidad de los recursos y la calidad del ambiente se verán considerablemente afectados, daños que probablemente serán irreversibles (Sandoval et al., 2017).



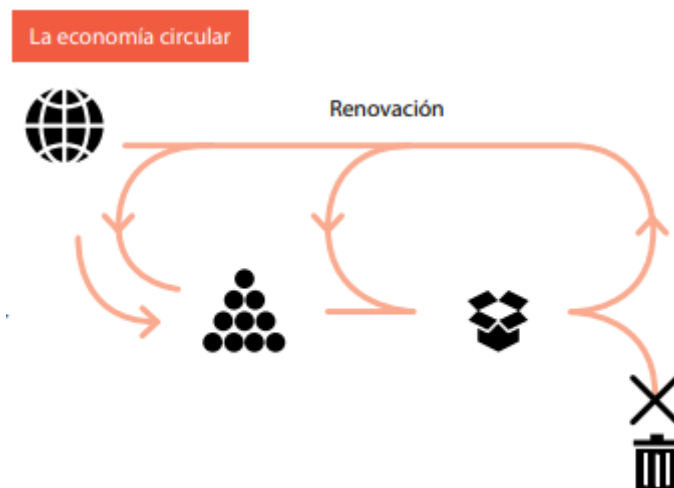
**Figura 3.** Diagrama de economía lineal.

Fuente: Pacto Industrial de la Región Metropolitana de Barcelona (2018).

La economía circular emerge a principios de los años noventa como alternativa ante las significativas demandas de recursos naturales y materias primas para suplir las necesidades de la población mundial que viene presentando un crecimiento exponencial apresurado, a ello se suma la dependencia entre países para su abastecimiento, el uso ineficiente de los recursos y su relación con el cambio climático, el derroche de materiales útiles desechados como residuos y la contaminación que éstas prácticas pueden producir en los ecosistemas (Gobierno de la República de Colombia, 2019).

Kirchherr et al., (2017) define la economía circular como:

Un sistema económico que se basa en modelos de negocio que sustituyen el concepto de “fin de vida” por la reducción, reutilización, reciclaje y recuperación de materiales en procesos de producción/distribución y consumo, operando así a nivel micro (productos, empresas, consumidores), nivel meso (parques eco-industriales) y nivel macro (ciudad, región, nación y más), con el objetivo de lograr un desarrollo sostenible, que implica crear calidad ambiental, prosperidad económica y la equidad social en beneficio de las generaciones actuales y futuras.

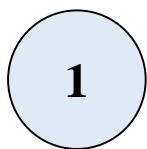


**Figura 4.** Diagrama de economía circular

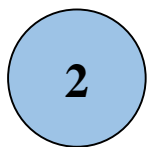
Fuente: Pacto Industrial de la Región Metropolitana de Barcelona (2018).

Este tipo de economía es restaurativa y regenerativa, la cual busca principalmente la alternativa de preservar el valor de uso de los bienes y servicios el mayor tiempo posible diseñando así la función de un ciclo de vida y evitando el consumo de nuevos recursos naturales (Lezzi, 2017). En pocas palabras el objetivo central de la economía circular es maximizar el aprovechamiento de los recursos y minimizar la generación de residuos no aprovechables (Marcet et al., 2018). Para el funcionamiento eficaz de esta economía se debe desvincular el desarrollo económico global del consumo de los recursos finitos y para que esto se logre se debe manejar bajo tres principios de actuación que se presentan en la *Figura 3*.

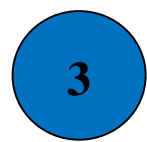
## Principios



**Preservar y mejorar el capital natural controlando reservas finitas y equilibrando los flujos de recursos renovables.** Cuando se necesitan recursos, el sistema circular los selecciona de forma sensata y elige tecnologías y procesos que utilizan recursos renovables o de mayor rendimiento, cuando resulta posible, este busca mejorar el capital natural generando condiciones para la regeneración.



**Optimizar los rendimientos de los recursos distribuyendo productos, componentes y materias con su utilidad máxima en todo momento tanto en ciclos técnicos como biológicos.** Esto implica diseñar para refabricar, reacondicionar y reciclar para mantener los componentes técnicos y materias circulando y contribuyendo a la economía, se maximizan el número de ciclos consecutivos y/o el tiempo empleado en cada ciclo, aumentando la vida útil de los productos y optimizando la reutilización.



**Promover la eficacia de los sistemas detectando y eliminando del diseño los factores externos negativos.** Incluye reducir los daños en sistemas y ámbitos como la alimentación, la movilidad, los centros de acogida, la educación, la sanidad y el ocio, y gestionar factores externos como el uso del suelo y la contaminación acústica, del aire y del agua o el vertido de sustancias tóxicas.

**Figura 5.** Principios de actuación de la economía circular.

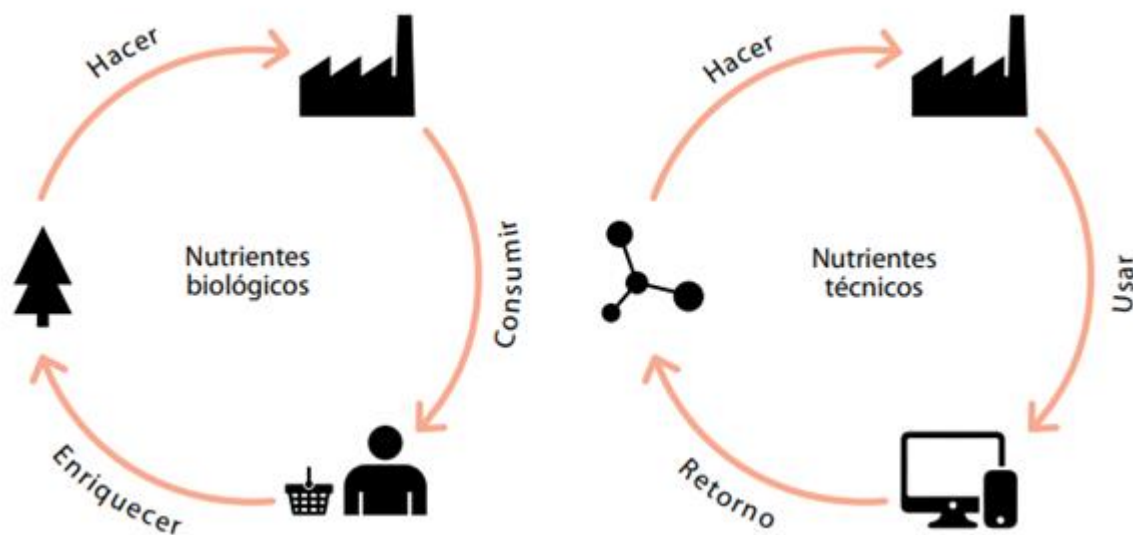
Fuente: Fundación Ellen MacArthur (2013). Elaboración propia.

Fue en el año 2012 cuando la economía circular tomó fuerza debido a la publicación de documentos de apoyo a gobiernos y empresas por parte de la Fundación Ellen MacArthur con el fin de fomentar la economía circular de tal manera que fuese vista como la vía en donde la sostenibilidad ambiental y social se incorpore con el desarrollo económico. Sin embargo, en Colombia ya se hablaba de algunas iniciativas acerca de la economía circular desde 1997 con la Política de Gestión de Residuos y la Política Nacional de Producción Más Limpia. Progresivamente se fueron instituyendo políticas donde la economía circular cada vez estaba más presente, el caso de la Política de parques industriales eco-eficientes por parte de la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá en el año 2000, el avance en la normativa sobre la responsabilidad del productor frente a la gestión de residuos peligrosos (2007), la normativa sobre residuos de pilas, acumuladores, computadores, periféricos y bombillas fluorescentes en el 2010 y más adelante en el mismo año la política de producción y consumo sostenible. Las políticas mencionadas cooperaron en la conceptualización de la economía circular, sin embargo, fue a partir del CONPES 3874 de 2016 Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos que el concepto de economía circular se incorporó de manera oficial para progresar en el cierre de ciclos en el país (Gobierno de la República de Colombia, 2019).

### 1.3.2. CARACTERÍSTICAS DE LA ECONOMÍA CIRCULAR

Para deducir los flujos de los recursos al interior de una economía circular (*Figura 6*) se acoge la clasificación dada a partir del concepto *Cradle to Cradle* (de la cuna a la cuna) el cual se fundamenta en el diseño integral de los productos para que al final de su ciclo de vida útil puedan ser considerados como nutrientes o materias primas aprovechables (Marcet et al., 2018). Se reconocen dos tipos de nutrientes o ciclos:

- **Nutrientes biológicos o ciclo biológico:** Comprende los flujos de materias renovables, principalmente a los materiales diseñados para incorporarse de modo seguro a la biosfera.
- **Nutrientes técnicos o ciclo técnico:** Comprende la gestión de reservas de materias finitas, principalmente materiales diseñados sin posibilidad de llegar a reintegrarse a la biosfera, pero aptos para la reincorporación al proceso circular de producción mediante procesos básicamente de reutilización y/o reciclaje que garanticen una alta calidad al reincorporarse.



**Figura 6.** Ciclos en la economía circular.

Fuente: Pacto Industrial de la Región Metropolitana de Barcelona (2018).

Es por esto que para llevar a cabo un eficaz y productivo proceso dentro de la economía circular se deben tener en cuenta características fundamentales para su correcta incorporación (Fundación Ellen MacArthur, 2013).

**Los residuos se eliminan del diseño.** Dentro de la economía circular, los residuos no existen y se eliminan del diseño, las materias biológicas no se consideran tóxicas y pueden devolverse fácilmente al suelo mediante compostaje o digestión anaerobia. Las materias técnicas polímeros, aleaciones y otras materias artificiales se diseñan para ser recuperadas, renovadas y mejoradas.

**La diversidad genera solidez.** La diversidad es un motor fundamental de versatilidad y resiliencia. En los sistemas vivos, por ejemplo, la biodiversidad es fundamental para sobrevivir a los cambios medioambientales, de forma similar las economías precisan de un equilibrio de varias escalas de actividades para prosperar a largo plazo.

**Las fuentes de energías renovables impulsan la economía.** La energía necesaria para impulsar la economía circular debería ser de carácter renovable, para así reducir la dependencia de los recursos y el deterioro de los mismos e incrementar la resiliencia de los sistemas.

**Pensar en “sistemas”.** El pensamiento de sistemas se aplica de forma generalizada, muchos elementos del mundo real como empresas, personas o plantas, forman parte de sistemas complejos en los que las distintas partes están fuertemente vinculadas entre sí, lo que tiene algunas consecuencias. Se deben tener en cuenta estos vínculos y consecuencias en todo momento.

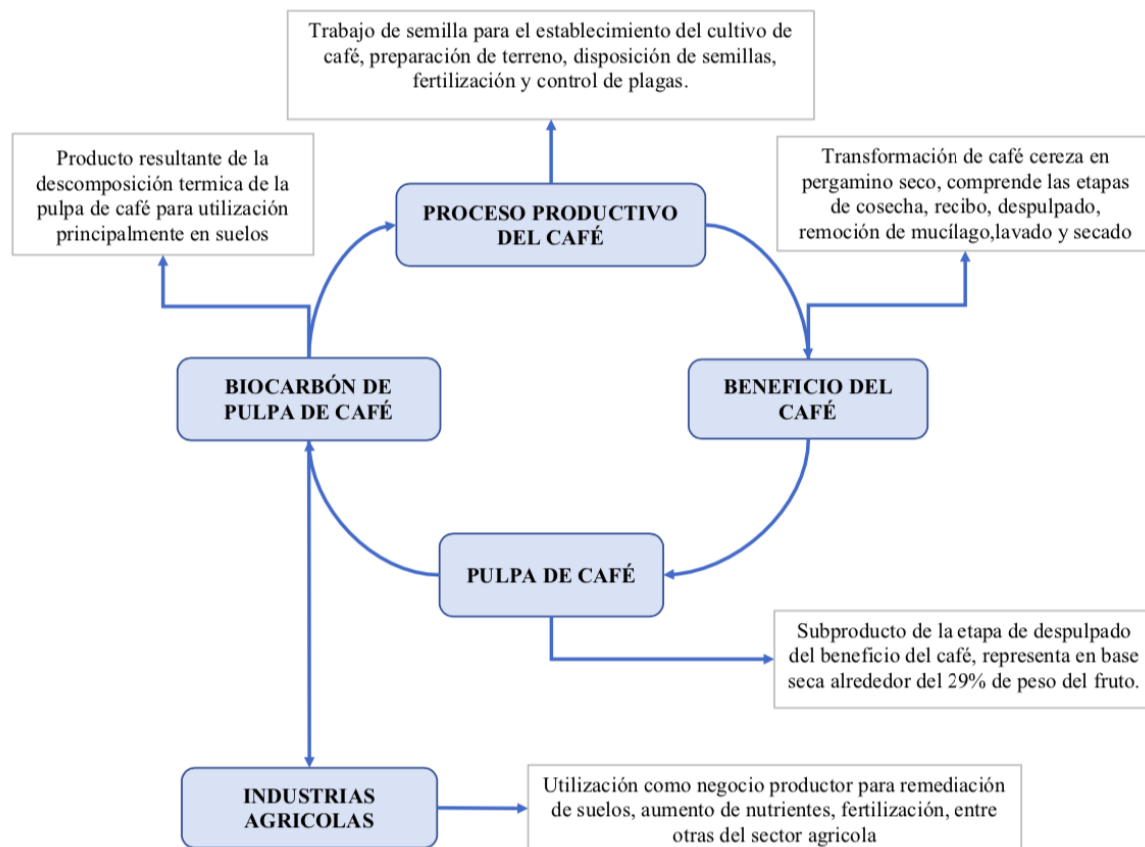
**Los precios u otros mecanismos de retroalimentación deben reflejar los costes reales.** Los costes totales los factores externos negativos se dan a conocer y se tienen en cuenta, eliminando los subsidios perversos. La falta de transparencia sobre los factores externos actúa como una barrera para la transición a una economía circular.

### 1.3.3. INTEGRACIÓN DEL BIOCARBÓN A LA ECONOMÍA CIRCULAR

Los diferentes procesos que se requieren para la obtención del grano de café específicamente aquellos implementados en la transformar del café cereza en pergamino seco se consideran como procedimientos o flujos lineales (*Figura 1*), como se ha dado a conocer en el desarrollo de éste trabajo, la inclusión y utilidad de estos subproductos después de la obtención del grano es muy poca o casi nula, incentivando a la inadecuada disposición de éstos dando lugar a la contaminación de los ecosistemas cafeteros de forma significativa.

Por tal motivo se estudia el biocarbón de pulpa de café como producto con posibilidades de incorporación a los procesos productivos que se realizan en la caficultura, es decir aprovechar al máximo el subproducto de pulpa extraído en el beneficio del café y convertirlo en biocarbón que sea útil para la enmienda de suelos, fertilización de cultivos, aporte de nutrientes, captura de CO<sub>2</sub> y que contribuya a la reducción de residuos orgánicos así como

también de la contaminación que produce el mal uso de este subproducto en las fincas cafeteras. Cabe destacar que el biocarbón de pulpa de café se puede establecer como beneficio económico para otras industrias agrícolas.



**Figura 7.** Incorporación del biocarbón de pulpa de café en proceso de la economía circular.  
Fuente: Elaboración propia.

La figura anterior corresponde a la propuesta de un modelo de economía circular asociado al aprovechamiento y reincorporación de la pulpa de café a los procesos desarrollados en actividades cafeteras. Transcurrida la etapa de despulpado durante el periodo de beneficio del café se obtiene la pulpa, el subproducto que dejará de ser considerado residuo del proceso para convertirse en la materia prima esencial para la producción de biocarbón, el cual se obtiene tras la descomposición térmica (pirólisis) de la biomasa (pulpa). El producto obtenido tiene dos vías de implementación, una de ellas es como insumo para las industrias agrícola y la otra es la incorporación al proceso productivo del café, en ambos casos su finalidad es la de mejorar las condiciones del suelo, favorecer el rendimiento de los cultivos y contribuir a la mitigación del cambio climático con la captura del CO<sub>2</sub> (Dióxido de Carbono).

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. CONSIDERACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS LOS BIOCARBONES

La obtención de información referente a las propiedades físico-químicas de los biocarbonos estudiados, se realizó mediante una revisión sistemática en sitios web, bases de datos como ScienceDirect y Google Académico. La búsqueda sistemática para la selección de los artículos se tuvieron en cuenta diferentes características esenciales clasificadas en biomásas sólidas y orgánicas por ser materias primas fáciles de convertir en carbón principalmente por contener propiedades nutricionales o grupos funcionales que permiten lograr la carbonización mucho más rápido, producción de biocarbón en pirólisis lenta que se da entre las temperaturas de 300 a 700°C generando una alta rentabilidad económica y fácil obtención del producto, concentración de macronutrientes y micronutrientes para conocer la disponibilidad nutricional de los diferentes biocarbonos, igualmente el porcentaje de cenizas, porcentaje de carbono fijo, materia orgánica, pH y conductividad eléctrica siendo componentes de gran importancia para los efectos que podrían tener los diferentes biocarbonos respecto a los usos agroindustriales, obteniéndose un total de 32 biocarbonos que cumplieran con estos criterios.

Es importante resaltar que la bibliográfica y las fuentes de información constituye una etapa fundamental en los diferentes proyectos de investigación dado que garantiza el hallazgo de datos relevantes para un tema de estudio específico (Gómez et al., 2014).

Posterior a la recolección de la información de los biocarbonos se utilizó el software estadístico Infostat para el análisis de los datos mediante técnicas de estadística descriptiva obteniendo parámetros como la media y la desviación estándar con el fin de realizar la comparación efectiva de las propiedades físico-químicas de los biocarbonos y el reconocimiento de las tendencias claves de los datos estudiados, para esto se agruparon los biocarbonos producidos con biomásas similares caracterizados de la siguiente manera:

**Tabla 3.** Agrupación de las biomásas.

Grupo	Número de biomásas	Descripción
1	4	Biomásas de cáscara de café y residuo de café agotado
2	4	Biomásas de cáscaras de frutas
3	2	Biomásas de cáscara de avellana
4	2	Biomásas de desechos alimentarios
5	5	Biomásas de Madera
6	2	Biomásas de bambú
7	5	Biomásas de palma
8	4	Biomásas de residuos de jardín y poda
9	2	Biomásas de rastrojo de maíz
10	2	Biomásas de alga y planta marina

Elaboración propia

Cabe resaltar que durante el análisis de la información obtenida mediante el Software Infostat el grupo número uno (1) siempre va a ser la referencia directa de comparación con las diferentes biomásas dado que este proporciona la caracterización físico-química referente a la cáscara (pulpa) de café con el fin de obtener los usos agroindustriales y ambientales del biocarbón de pulpa de café.

## **2.2. DEFINICIÓN DE EFECTIVIDAD Y POSIBLES USOS AGRÍCOLAS DEL BIOCARBÓN DE PULPA DE CAFÉ**

Dado a la cantidad de variables tenidas en cuenta para la caracterización de los biocarbones fue oportuno acudir al análisis estadístico multivariado que permitiera interpretar y visualizar las diferentes variables (Nieto, 2002), con el propósito de medir, explicar y predecir el grado de relación de interdependencia que se presentó entre las variables mencionadas en la metodología del objetivo anterior. Para ello se ingresaron los datos al software Infostat bajo la técnica de Conglomerados, que mediante la distancia Euclidiana entre variables y análisis de Clúster permite la formación de grupos donde se buscó fragmentar la muestra en grupos semejantes, a partir de una matriz que comprendiera variables como el N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Mn, Zn, Na, Cenizas, pH y el uso que se le fue designado a cada biomasa, permitiendo la creación de grupos o conglomerados de tal manera que se formaran clases de biocarbones similares. Cada conglomerado se clasificó en homogéneos según la variable *tipo de biomasa* para formar los grupos, con el fin de reconocer, describir y comparar que la variabilidad intraclase fuera inferior a la variabilidad entre clases.

Así mismo se recurrió al análisis de varianza con el objetivo de identificar semejanzas en la composición y características de los biocarbones hechos de las diferentes biomásas y poder relacionar sus usos con la biomasa de café, para ello se realizó comparación de medias con el Método de Duncan y poder conocer las igualdades existentes entre biomasa de café y las demás evaluadas.

## **2.3. CONSTITUCIÓN DE BENEFICIOS ECONÓMICOS Y SOCIALES DEL BIOCARBÓN DE PULPA DE CAFÉ**

Con el fin de conocer un estimado del precio de venta del biocarbón de pulpa de café se realizó una aproximación de los costos de producción para obtener diariamente 150 kilogramos de biocarbón, los costos estuvieron asociados a mano de obra directa, suministros, empaque y distribución. Para obtener una estimación de costos lo más cercano posible a la realidad, se planteó una situación hipotética en una finca caficultora que estaría ubicada en el corregimiento de Altagracia del municipio de Pereira (Risaralda) donde se llevarían a cabo labores de beneficio del café, y donde se pretendía realizar un aprovechamiento de un subproducto como la pulpa de café. Se elaboró una matriz de costos en la que se integraron los valores diarios y mensuales de cada variable, la cantidad requerida para la producción y el valor total de producción. Los costos fueron determinados en función de su reincorporación de la pulpa por medio del biocarbón al proceso productivo del café y



de la posibilidad de su comercialización como producto agrícola, a partir de ello se establecieron los beneficios socioeconómicos y ambientales que se pueden obtener de él.

Una vez identificadas las variables de mayor incidencia en la adjudicación del uso al biocarbón de pulpa de café, desde el método de la regresión hedónica se estimó su costo total por medio de la descomposición de sus atributos, en este caso establecidos por el porcentaje de macronutrientes de mayor trascendencia como el N, P, K, Ca, Mg y S. A partir de ésta valoración económica se planteó una comparación entre la utilidad del biocarbón de pulpa de café y la de productos agrícolas comerciales que fuesen empleados para cumplir con las mismas funciones del biocarbón, por lo tanto, se seleccionaron productos de origen inorgánico como la Cal Dolomita y el Fosfato Diamónico, productos de origen orgánico como la gallinaza, el lombricompost y el abono orgánico. Se indicó el contenido de macronutrientes y el precio de venta de cada uno de los productos incluyendo el biocarbón, la estimación de su precio fue posible a partir de la búsqueda de biocarbones o carbones vegetales que se asemejaran a las características físico-químicas del biocarbón en estudio. De este modo se dieron a conocer las particularidades de cada uno frente a la disponibilidad de nutrientes y la relación funcional entre el precio del producto agrícola y las variables que lo complementan o sustituyen, así se logró determinar la preferencia del biocarbón frente a otros productos con la misma utilidad.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **3.1. RECONOCIMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE BIOCARBONES PRODUCIDOS A PARTIR DE DIFERENTES BIOMASAS**

Se realizó la matriz de caracterización física y química con un total de 32 biocarbones producidos a través del proceso de pirólisis lenta entre temperaturas de 400 y 600°C principalmente, incluyendo las variables de macro y micronutrientes, porcentaje de cenizas, porcentaje de carbono fijo, materia orgánica, pH y conductividad eléctrica, así como la caracterización del uso potencial de cada biocarbón (*Anexo I*), posterior a esto se realizó el análisis descriptivo para las diferentes propiedades física y química de los biocarbones seleccionados evaluando variables de media y desviación estándar.

Los macro y micronutrientes son elementos esenciales tanto para plantas (Kirkby, 2008) como animales (FAO, 2015); ya que en las plantas son los encargados de proporcionar funciones específicas evitando las debilidades en sus estructuras, que sean susceptibles a plagas y enfermedades, la baja calidad alimentaria y cosechas de poca productividad y durabilidad (Kolmans, 1999). En los animales los macro y micronutrientes también cumplen un papel importante en su nutrición proporcionando energía y facilitando las reacciones químicas necesarias para su funcionamiento metabólico (FAO, 2015).

Dentro del análisis descriptivo para los elementos correspondientes a los macronutrientes en la *tabla 4* se pueden observar valores próximos a los hallados en la biomasa de cáscara de

café con la biomasa de palma y rastrojo de maíz en los elementos de fósforo y calcio con valores de 1,3 g/kg; 11,59 g/kg y 1,98 g/kg; 10,54 g/kg respectivamente; lo que lleva a una aproximación a la utilidad del biocarbón de cáscara de café por su similaridad con los antes mencionados en la fertilización de suelos, retención de contaminantes, ayuda en la mitigación del cambio climático, germinación eficaz en los cultivos (Houben et al., 2013, Usman et al., 2015, Guerra 2015, Enders et al., 2012, Herrera et al., 2018). Igualmente se encontraron valores cercanos en cuanto al elemento de nitrógeno con las biomásas de cáscara de avellana con valores promedio de 2,65% y desechos alimentarios con valor de 2% lo cual es de gran importancia en el biocarbón puesto que este elemento se puede retener temporalmente soluble en la estructura del biocarbón y liberarlo en pequeñas dosis, incrementando así la eficiencia y la productividad de los cultivos (Zheng et al., 2013). Por otro lado, se evidenció similaridades con las biomásas de cáscara de avellana y madera en los elementos de azufre con valores de 0,16 mg/kg y 0,5 mg/kg respectivamente y sodio con valores de 427 mg/kg y 742,2 mg/kg respectivamente dando una posibilidad de uso para la fertilización de suelos y la mitigación del cambio climático (Enders et al., 2012).

**Tabla 4.** Promedio de los macronutrientes de los biocarbones producidos a partir de las diferentes biomásas identificadas en la revisión sistemática.

BIOMASAS	N %	P	K	Ca g/Kg	Mg	S
Cascara de café	2,08±1,9b	1,41±2,2b	2,09±2,8a	11,12±7,8b	1,90±2,9ab	0,13±0,1b
Cascara de frutas	14,02±0,0d	27,20±14,9c	57,35±27,3a	3,18±2,9b	1,76±2,6ab	191,52±162,8c
Cascara de avellanas	2,65±0,5b	0,30±0,1b	4,73±0,6a	2,98±0,4b	0,54±0, a	0,16±0,0b
Desechos alimentarios	2,00±1,1b	7,84±0,4b	24,64±4, 7a	63,6±13,9bc	5,51±1,5bcd	1,13±0,1b
Madera	0,20±0,1b	0,07±0,1b	1,25±0,6a	2,62±0,4b	0,56±0,5a	0,15±0,1b
Bambú	10,05±0,0c	4,30±0,0b	177,85±218b	100,95±131,6c	7,93±6,5cd	0,80±0,0b
Palma	3,93±5,4bc	1,3±0,9b	4,35±3,3a	11,59±8,3b	3,86±1,6abc	1,13±0,7b
Residuos de Jardín y poda	0,36±0,5b	3,54±5,7b	18,26±29,1a	20,72±24,1b	2,57±2,9ab	1,85±2,9b
Rastrojo de maíz	1,10±0,0b	1,98±0,2b	24,72±0,1a	10,54±1,6b	9,05±0,7d	0,77±0,1b
Alga y planta marina	SD	SD	0,22±0,2	SD	3,12±1,1ab	SD

Valores medios, ± desviación estándar. N: Nitrógeno, P: Fosforo, K: Potasio, Ca: Calcio, Mg: Magnesio, S: Azufre, SD: Sin dato, Letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) por medio del test de Duncan. Fuente: elaboración propia

Para el análisis descriptivo de los elementos correspondientes a los micronutrientes en la *tabla 5* se puede observar una gran disimilitud entre los datos del elemento hierro con un valor promedio de 765,95 mg/kg en las diferentes biomásas y un valor de 4,9 mg/kg en la biomasa de cáscara de café, respecto al elemento cobre se pueden observar valores por debajo del valor guía de la cáscara de café la cual cuenta con un valor de 3,8 mg/kg, algunas biomásas presentan un promedio de 0,35 mg/kg mientras que la biomasa de alga y planta marina tiene un valor de 39,95 mg/kg, el resto de biomásas no presentan datos para este

elemento, igualmente cabe resaltar que se encuentran pocas semejanzas de datos entre los elementos de manganeso y zinc, los cuales son fundamentales para la funcionamiento enzimático y la eficiencia de los cultivos y suelos (Kolmans, 1999).

**Tabla 5.** Promedio de los micronutrientes de los biocarbones producidos a partir de las diferentes biomásas identificadas en la revisión sistemática.

BIOMASAS	Fe	Cu	Mn	Zn	Na
	mg/kg				
Cascara de café	4,90±0,6a	3,80±0,0e	0,40±0,0b	1,10±0,0a	593,05±836,4bc
Cascara de frutas	55,31±76,9a	0,96±0,7e	48,78±50,7b	14,8±20,5a	201,31±134,3b
Cascara de avellanas	35,00±9,9a	SD	18,00±4,2b	16,5±4,9a	427±28,3bc
Desechos alimentarios	3745±1863,9b	SD	159,5±58,7b	64±0,0ab	14103±565,7d
Madera	1054,20±1792,6a	SD	184,60±151,9b	46,2±32,26ab	742,2±588,3bc
Bambú	1,84±2,4a	0,44±0,6e	2,11±2,7b	0,64±0,86a	151,15±213,3b
Palma	0,27±0,1a	0,01±0,0e	0,75±0,5b	0,03±0,01a	0,62±0,3b
Residuos de Jardín y poda	788,82±857,6a	0,0031±0,0e	264,26±243,9b	69,76±61,7ab	1194,26±1251,1bc
Rastrojo de maíz	1212,5±211,4a	SD	212,50±19,1b	71±1,41ab	1461,5±109,6c
Alga y planta marina	0,65±0,2a	39,95±5,73f	SD	103,85±29,9b	SD

Valores medios,  $\pm$  desviación estándar. Fe: Hierro, Cu: Cobre, Mn: Manganeso, Zn: Zinc, Na: Sodio, SD: Sin dato, Letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) por medio del test de Duncan.

Fuente: Elaboración propia.

Por último se analizaron las características físico-químicas de los diferentes biocarbones (Tabla 6), donde podemos concluir poca similitud entre las biomásas en las diferentes variables evaluadas, sin embargo se destaca la variable de pH ya que la mayoría de las biomásas presentan un valor por encima de 7 con un promedio de 9,1 siendo elementos alcalinos, lo cual es beneficioso para el mejoramiento de propiedades físicas del suelo como porosidad, infiltración de agua, estructura, entre otros; también como material de encalado por presentan valores de pH altos (Escalante, 2016). Variables como cenizas, carbono fijo y conductividad eléctrica presentan poca similitud en los datos siendo estas características generales del biocarbón correspondientes al sólido que queda después de que la materia volátil es liberada (McLaughlin *et al.*, 2009).

Se encontraron semejanzas entre la biomasa de cáscara de café con las biomásas de cáscara de avellana, madera, rastrojo de maíz y residuos de jardín y poda referente al elemento de Carbono el cual actúa como reservorio de larga duración, retardando su retorno a la atmósfera como CO<sub>2</sub>, situación que contribuye a mitigar el cambio climático (Escalante, 2016), por último se observa que la variable de materia orgánica tiene un valor de 46,3 g/kg para la biomasa de cáscara de café lo cual es un valor bajo respecto a las otras biomásas las cuales tienen un promedio de 534,92 g/kg.

La biomasa de cáscara de café en comparación con otras biomásas, da a conocer que esta se caracteriza como más alcalina, igualmente se logró observar que variables como el pH y la conductividad eléctrica eran mayores comparados con la biomasa de mazorca de maíz,

concluyendo que estos valores se pueden dar por la hidrólisis experimentada por carbonatos y bicarbonatos de cationes base como el calcio, el magnesio, el sodio y el potasio, en cuanto a la conductividad eléctrica indica la existencia de sales solubles en el agua, igualmente valores de fósforo, carbono y nitrógeno fueron mayores dando a concluir que el biocarbón de cáscara de café tiene un uso importante para mejorar las propiedades físicas y químicas de los suelos ácidos (Dume et al., 2015). Así mismo, se puede observar que la biomasa de cáscara de café comparada con biomasa de exoesqueleto de langostino y coronta de maíz, logra presentar datos respecto a todas las variables analizadas de C, O, K, Ca, Mg, Si, Al, S y P mostrando resultados diferentes y caracterizándose para el uso eficiente de la germinación de cultivos, en comparación con las otras biomasa (Herrera et al., 2018), igualmente este puede ser utilizado directamente como combustible sólido por diferentes sectores industriales y residenciales como fuente de energía por su composición (Tsai, 2011).

**Tabla 6.** Promedio de las Características físico-químicas de los biocarbones producidos a partir de las diferentes biomasa identificadas en la revisión sistemática.

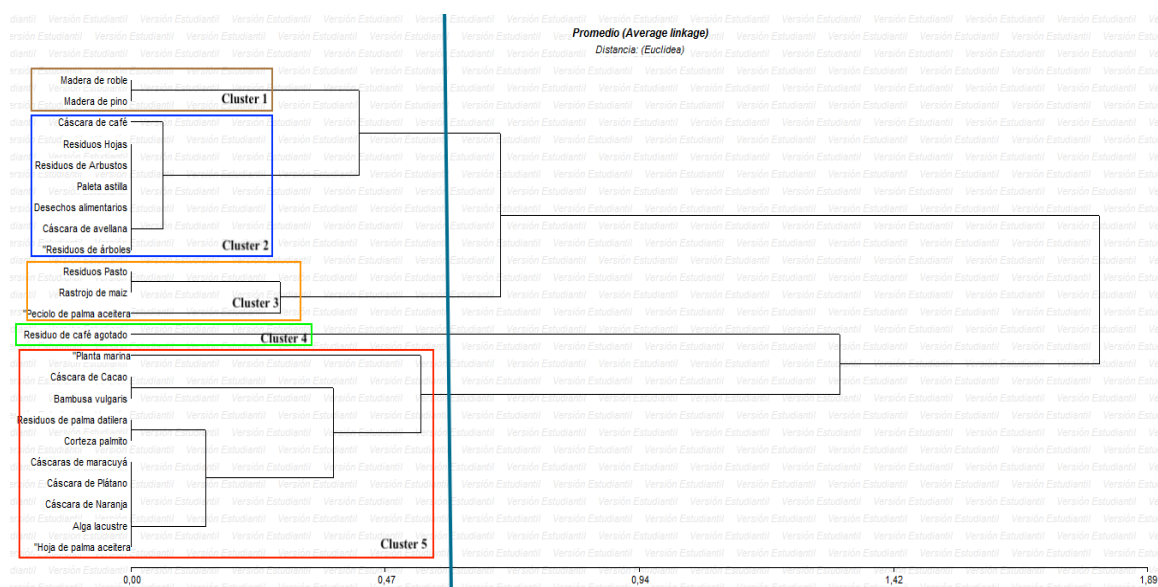
BIOMASAS	C	O	H	Cenizas	Cf	pH	MO	CE
			%				g/kg	dS/m
Cascara de café	72,24±17,9d	21,2±19,2e	6,95±0,0g	1,92±1,7a	8,23±0a	10,57±0,6c	46,39±0g	6,44±0,0cd
Cascara de frutas	SD	SD	SD	20,73±0,0bc	47,22±0bc	8,14±1,94ab	238,42±375,1g	6,92±0,0d
Cascara de avellanas	84,5±5,2e	12,7±2,55e	0,5±0,0e	2,05±0,21a	64,55±5,2cd	8,7±0,14bc	SD	1,55±0,07b
Desechos alimentarios	37±7,07c	SD	SD	52,35±0,5d	13,6±0a	10,25±0,8c	SD	2,15±0,49bc
Madera	86,66±2,9e	10,05±1,8e	2,58±0,2f	2,28±1,6a	61,78±13,4cd	6,34±0,9a	SD	1,84±2,05bc
Bambú	SD	SD	SD	7,46±0,0ab	76,35±0d	9,48±0,1bc	469,23±663,2g	2,03±0,7bc
Palma	50,37±26,6b	18,3±18,25e	3,24±1,02f	15,21±5,5abc	62,48±11cd	9,01±0,5bc	897,11±73,8g	2,32±1,42bc
Residuos de Jardín y poda	76,8±11,02cd	SD	SD	13,93±11,9abc	54,4±8,0cd	8,63±0,0bc	SD	1,88±3,2bc
Rastrojo de maíz	70,5±0,28de	10±1e	2,1±0,3ef	17,15±0,6abc	55,55±6,0cd	9,95±0,07bc	SD	1,95±0,07bc
Alga y planta marina	42,75±17,32c	53,45±19,3f	2,3±1,7ef	27,5±14,8c	24,9±8,1ab	10,4±0,5c	SD	SD

Valores medios, ± desviación estándar. C: Carbono, O: Oxígeno, H: Hidrogeno, Cf: Carbón fijo, MO: Materia Orgánica, CE: Conductividad eléctrica, SD: Sin dato, Letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) por medio del test de Duncan. Fuente: Elaboración propia.

### 3.2. POSIBLES USOS AGRÍCOLAS DEL BIOCARBÓN DE PULPA DE CAFE

La identificación de los usos potenciales de los biocarbones mediante la conformación de clúster por medio del análisis de conglomerados donde a partir de la variable de la distancia euclidiana se logró la formación de cinco (5) clúster correspondientes a las diferentes biomasa evaluadas (*Figura 8*), destacándose el clúster dos (2) por encontrarse en este la biomasa de cáscara de café permitiendo observar las similitudes en cuanto a los usos que pueden haber entre esta y las diferentes biomasa obtenidas en dicho grupo, conformadas por

residuos de hojas, residuos de arbustos, residuos de árboles, paleta astilla, desechos alimentarios y cáscara de avellana.



**Figura 8.** Análisis de conglomerados de las diferentes biomásas. Elaboración: Software Infostat.

Las semejanzas que se dan en el grupo dos (2) referente a las biomásas utilizadas se enfocan principalmente en la fertilización de suelos con el objetivo de lograr su mejoramiento, obteniendo mayor rendimiento y eficiencia en diferentes cultivos, así como su utilización para la mitigación del cambio climático y la retención de elementos contaminantes en el suelo por las propiedades físico-químicas presentes en estos biocarbones; la utilización alternativa de estos puede llevar a una disminución significativa en cuanto a la utilización de fertilizantes comerciales con características perjudiciales para el ambiente como lo es la eutrofización de fuentes de agua, contaminación de suelos con elementos químicos y acumulación de elementos trazos contenidos en productos como fertilizantes, herbicidas y pesticidas utilizados en la producción agropecuaria para mayor disponibilidad y actividad (Bernardo et al., 2014).

El biocarbón de cáscara de café se ha utilizado en la influencia en el tiempo de germinación y el incremento de masa de parte aérea durante el crecimiento de la plántula estudiada de *Capparis Scabrida*, lo cual indica que se puede utilizar en la efectividad de germinación en diferentes cultivos (Herrera et al., 2018), igualmente se caracteriza por servir como enmienda para plantas acumuladoras de alto contenido de Silicio (Si), aumentando la fertilidad en los suelos y el secuestro de Carbono (C) (Houben et al., 2013), por último en suelos ácidos la adición de este biocarbón mejora en la fertilidad del suelo y rendimiento de los cultivos, igualmente la aplicación de este da una mejora en las propiedades químicas del suelo como el pH, Conductividad eléctrica, materia orgánica, nitrógeno y fósforo disponible, logrando su mayor productividad (Dume et al 2015).

Para los biocarbones elaborados con biomásas de Residuos de arbustos, residuos de hojas, desechos alimentarios, cáscara de avellana y paleta astilla se encuentran similitudes con la biomasa de cáscara de café en cuanto a las propiedades elementales indicando que pueden tener la misma estabilidad y retención de carbono, así como su efectividad en el mejoramiento del pH del suelo (Enders, *et al* 2012) y por último el biocarbón elaborado con biomasa de residuos de árboles presenta una alta producción de biomasa y absorción de nitrógeno (N) en las plantas de trigo y rábano, igualmente se caracteriza por presentar aumentos significativos en la actividad microbiana de los suelos (Zwieten *et al* 2010). En este sentido el biocarbón de cáscara de café puede presentar potencialidades para ser utilizado por su aporte en las mejoras en el suelo y contribuir con la mitigación del cambio climático y la absorción de diferentes elementos contaminantes.

En el análisis de varianza y la comparación de Duncan (*Anexo 2*) se integraron los diez (10) grupos de biomásas formados, encontrándose resultados que permiten identificar las similitudes entre las biomásas dadas en cada una de las variables y comparándolas con la biomasa de cáscaras de café, considerada en este trabajo como el referente de análisis, con respecto a los demás grupos para cada una de las variables evaluadas, es decir, que se interpretaron solo aquellos materiales que tuviesen una letra en común con el conjunto conformado por las cáscaras de café indicando la semejanza entre las mismas. Cabe mencionar que aquellos materiales que solo indicaron un dato o ninguno frente a la variable analizada, es decir que el valor de  $n=0$  o  $n=1$  no fueron tenidas en cuenta para la discusión debido a que no proporcionaron información significativa.

Dentro de los elementos correspondientes a los macronutrientes (*Tabla 4*), se puede destacar la similitud que existe entre las biomásas compartiendo valores similares en cuanto al elemento de Nitrógeno excepto la de cáscara de frutas, bambú y alga marina, donde el valor más alto corresponde a la biomasa de palma con un total de 3,93 %. El elemento fósforo tiene igualmente similitud con la mayoría de biomásas excepto con la cáscara de frutas y el alga marina donde el valor más alto es de 7,84 mg/kg correspondiente a la biomasa de desechos alimentarios. Para el potasio se comparten similitudes con el 90% de las biomásas excepto la de bambú, el valor más alto para este elemento se le encuentra en la biomasa de cáscara de frutas con un valor de 47,35 g/kg. El elemento calcio no comparte similitud con las biomásas de bambú y alga marina, teniendo el valor más alto en los desechos alimentarios 66,6 g/kg. Correspondiente al elemento de magnesio se encuentran similitudes con el 80% de las biomásas quedando por fuera las el bambú y el rastrojo de maíz, representado el valor más alto en la biomasa de desechos alimentarios con 5,51 g/kg, por último, para el elemento azufre se comparten similitudes con la mayoría de biomásas a excepción de la cáscara de frutas y de alga marina, representando el valor más alto con la biomasa de residuos de jardín y poda con un total de 1,85 g/kg.

Para el análisis correspondiente a los micronutrientes (*Tabla 5*), se encontraron similitudes teniendo como base la biomasa de la cáscara de café, con respecto al elemento Hierro se encuentra el 90% de las biomásas comparadas excepto la de desechos alimentarios y con valor más alto con el rastrojo de maíz con un total de 1212,5 mg/kg. Para el elemento correspondiente al cobre se hallaron similitudes con las biomásas de cáscara de avellana, bambú, palma y residuos de jardín y poda, donde el valor más elevado lo obtuvo la biomasa de principal interés con 3,8 mg/kg. En cuanto al Magnesio, la similitud de valores fue

compartida con el 90% de las biomásas, quedado por fuera la de alga marina y teniendo el valor más alto la de residuos de jardín y poda con 264,26 mg/kg, las mismas similitudes fueron halladas en el elemento Zinc, pero el valor más alto corresponde a la biomasa de rastrojo de maíz con 71 mg/kg. El último elemento analizado fue el Sodio, elemento con el cual la cáscara de café tiene similitudes con el 80% de las biomásas, quedando por fuera el alga marina y los desechos alimentarios, la biomasa de rastrojo de maíz obtuvo el valor máximo de 1461,5 mg/kg.

Por último, para las características físico-químicas (*Tabla 6*), el elemento de carbono, la cáscara de café tiene valores similares al 50% de las biomásas donde el valor más alto es el de la biomasa de madera con 86,66 %. En cuanto al elemento Oxígeno, las similitudes se vieron en pocas biomásas cáscara de avellana, madera, palma y rastrojo de maíz, siendo 21,26 el valor más elevado perteneciente a la biomasa de cáscara de café. Para el Hidrógeno, la muestra de cáscara de café no tuvo similitud con ninguna muestra y su valor fue de 6,95 %. Con respecto a las cenizas, el valor para la cáscara de café fue similar al 60% de las biomásas para esta última el valor más alto se dio en el rastrojo de maíz con un total de 17,15 %.

Siguiendo con la comparación de los resultados, el Carbón Fijo, se halló similitudes solo con las biomásas de cáscara de avellana y el alga marina, siendo esta última la de mayor valor con 24,9 %. Para el contenido de Materia Orgánica, la cáscara de café tiene valores similares a las biomásas de cáscara de avellana, bambú y palma siendo esta última la que mayor valor presenta con 897,11 g/kg. Para pH, la cáscara de café tiene similitud con el 70% de las biomásas el valor más alto fue para la biomasa de cáscara de café con 10,57. Por último, para la Conductividad Eléctrica, se observó similitud con el 80% de las biomásas, arrojando como valor más alto 6,92 dS/m para la biomasa de cáscara de avellana.

De todas las comparaciones se pudo identificar y extraer las variables que más similitud tuvieron en el análisis de varianza siendo los elementos correspondientes al nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, hierro, manganeso, zinc, sodio, porcentaje de cenizas y de carbón fijo, pH y conductividad eléctrica siendo importantes para identificar y relacionar los respectivos usos potenciales de las diferentes biomásas correspondientes al clúster 2.

Dentro de la biomásas correspondientes a la cáscara de café, Tsai (2011), muestra que los elementos correspondientes a los micronutrientes Fe, Mn, Zn y Na presentan concentraciones muy bajas en comparación con los macronutrientes N, P, K y Mg, junto con elementos inorgánicos que presentan formas de óxido lo cual permite la utilización como transferencia de calor, igualmente Herrera (2018) señala que los macro y micronutrientes cuentan con concentraciones bajas igual que el porcentaje (%) de cenizas, resaltando que este al contar con minerales esenciales como el Mg, S y P, permite tener una germinación eficaz dentro de diferentes cultivos. Dume (2015) demuestra que el pH y la conductividad eléctrica cuenta con valores altos igualmente las diferentes características físico-químicas presentan valores mayores respecto al biocarbón de mazorca de maíz con el cual se comparó originalmente, concluyendo que el biocarbón de cascara de café es más efectivo en cuanto a la mejora de las propiedades físicas y químicas de suelos ácidos.

### **3.3. BENEFICIOS SOCIOECONÓMICOS DE LA PRODUCCIÓN DE BIOCARBÓN DE PULPA DE CAFÉ**

Desde el ámbito de la economía se define el concepto de beneficio como la proporción monetaria que surge a partir de la diferencia entre los ingresos y los costos de inversión de una actividad económica, estos últimos conformados por costos de recursos que son variables y fijos, recursos que pueden estar dados en capital, trabajo o tiempo. Los costos son asumidos con el propósito de lograr ingresos iguales o superiores a la inversión realizada, de allí surgen los beneficios, algunos de ellos pueden ser fácilmente medibles y cuantificables mientras que para otros su valoración se hace compleja (López, s.f), como el grado de satisfacción de un trabajador de su puesto de trabajo a nivel social o los de tipo ambiental como los relacionados a la conservación y uso racional de los recursos naturales (Organización de los Estados Americanos, s.f).

Los beneficios medibles pueden estar enmarcados por la posibilidad de producir ingresos económicos al momento de comercializar los productos, favorece la generación de nuevos puestos de trabajo para personas que no cuentan con ingresos suficientes para suplir al menos sus necesidades básicas, reduce la inadecuada disposición de residuos originados por las diversas actividades desarrolladas por el ser humano, minimiza los costos destinados a la adquisición de productos potencialmente contaminantes y que a su vez pueden ser sustituidos por alternativas sostenibles (Hernández, 2018).

Por su parte, la economía circular como herramienta estratégica para la reestructuración del modelo económico actual basado en un enfoque lineal, genera una serie de beneficios que surgen de la adopción de procesos recirculatorios, que fomentan acciones preventivas y correctivas que conllevan a la sostenibilidad. Los principales beneficios originados desde la economía circular se asocian a la prevención de riesgos y la gestión de los recursos naturales de modo que se asegure la estabilidad del planeta y la calidad de vida los habitantes, contribuye a la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, disminuyen los niveles de consumo de materias primas, favorece la productividad y calidad del suelo, además de aportar en el recorte de externalidades negativas como la contaminación, vertimiento de sustancias nocivas para el ambiente, el inadecuado uso del suelo y el cambio climático (Espaliat, 2018).

#### **3.3.1 Análisis de costos de producción del biocarbón de pulpa de café**

La estimación aproximada de los costos de producción del biocarbón de pulpa de café permitió reconocer los gastos totales que son requeridos para llevar a cabo su proceso de elaboración y comercialización, a partir de la disponibilidad de los insumos necesarios para tal fin. En este caso se evaluaron los costos que demandaría la producción de 150 Kg de biocarbón de pulpa de café, teniendo presente que es la producción máxima que se obtendría diariamente en el horno pirolítico que se describe a continuación. Se planteó una situación hipotética la cual se vinculó a la transformación y utilización de la biomasa (residuo de pulpa de café) en finca caficultora en el corregimiento de Alta gracia, a 10 Km de la cabecera municipal de Pereira (Risaralda) donde se efectúan procesos de beneficio del café.



La elaboración del biocarbón se realizaría en un horno pirolítico conformado por un tambor cilíndrico de 70 cm de diámetro y 100 cm de alto, fabricado en acero inoxidable con capacidad de 0,473 m<sup>3</sup> (Guerra, 2015), funcionaría como cámara de combustión y podría albergar alrededor de 54 Kg de biomasa. Al momento de incorporarse la pulpa seca, se cortaría el ingreso del oxígeno sellando el horno con su respectiva tapa, este proceso se daría en el lapso de tres (3) horas que corresponde al tiempo de duración de la pirolisis bajo estas condiciones y a temperaturas por debajo de 600°C.

El trabajador, un campesino, contratado para la labor de producción de biocarbón y quien según el gobierno nacional deberá recibir al menos un sueldo mínimo mensual de \$1'479,684 (López, 2019) sin embargo en Colombia las labores del campo no son dignificadas, esto se ve reflejado en la carencia de seguridad social, el no pago por horas extras, inexistencia de auxilio de transporte, dotación inadecuada, ausencia de vacaciones, cesantías y demás que conforman las prestaciones sociales que corresponden al trabajador (Domínguez, 1998), por lo tanto se reduce el monto salarial al mínimo libre (\$877,803 vigentes) quizá menos en algunos casos mucho más deplorables. Esta persona trabajaría ocho (8) horas diarias según el Código Sustantivo del Trabajo (Art.161) durante seis (6) días a la semana, por lo tanto, se estima una producción diaria de 150 Kg obtenidos a partir de tres quemas, lo que indica que al mes se estaría alcanzando una producción de 3,600 Kg de biocarbón de pulpa de café.

La *tabla 7* agrupa los costos correspondientes a la producción diaria de 150 Kg de biocarbón de pulpa de café, son los gastos necesarios para conservar los procesos de obtención del producto. La producción de un bien implica acudir a gastos, lo que conlleva a unos costos, los cuales deben mantener en lo posible valores bajos y evitar aquellos que son considerados innecesarios (FAO, s.f). En esta aproximación del análisis de costos de producción solo fueron tenidos en cuenta los costos variables o directos que aplicaran a la situación planteada y los costos relacionados con la distribución del producto resultante. La materia prima como fuente principal de elaboración del biocarbón no estuvo integrada en el costeo dado que sería proporcionada como desecho por el beneficiadero de café, una iniciativa con la que se pretende aprovechar al máximo este tipo de residuo y reducir los impactos ambientales que produciría si tuviese una disposición final convencional, por lo tanto no implicaría una inversión para su obtención siendo este considerado el primer beneficio socioeconómico y ambiental de esta alternativa.

Siguiendo con la identificación de los costos de producción se considera que hacen parte de los costos variables la mano de obra directa (MOD) requerida, los suministros necesarios para la producción, los costos de empaquetado y distribución del producto, para cada uno de los costos se estableció un aproximado en cuanto a la cantidad de elementos, de productos, distancia y número de personal que demandaría la elaboración del biocarbón. Asimismo, se determinaron los valores unitarios diarios y mensuales de cada insumo expresados en unidades de COP (\$) vigentes, esto se pudo realizar por medio de consultas de los productos y sus precios en las páginas web oficiales de empresas extranjeras como Mercado Libre Colombia y Sodimac Homecenter con sede en el país.

**Tabla 7.** Costos de producción de 150 Kg de biocarbón de pulpa de café

<b>Costo de Producción</b>	<b>Cantidad de producción diaria</b>	<b>Valor diario (\$)</b>	<b>Valor mensual (\$)</b>
Mano de Obra Directa*	1 operario	61.653	1.479.684 (a)
Bioetanol	26 ml	340,27	8.166 (b)
Fósforos	2 unidades	8,30	199.33 (c)
Guantes de carnaza	1 par	-	6.250 (d)
Mascara con filtro	1	-	45.000 (e)
<b>Subtotal costos de Producción</b>		<b>61. 769</b>	<b>1.539.299</b>
Sacos de polipropileno	3 sacos de 50 Kg c/u	1.090	78.480 (f)
<b>Distribución</b>			
Flete	1 día de transporte	7.958	31.832 (g)
<b>Total, costos de producción y distribución</b>		<b>73.024</b>	<b>1.649.611</b>

\*Incluye prestaciones sociales, a) Periódico La República (27 de diciembre de 2019), b), d), e) Mercado Libre Colombia, c) Merqueo Bogotá, f) Sodimac Homecenter, g) Global Petrol Prices (22 de junio de 2020) cuatro viajes mensuales con una producción total de 3600 kg. Elaboración: Propia

Los valores de la tabla anterior relacionados con los costos diarios están en función de la producción de 150 Kg de biocarbón en una jornada laboral de 8 horas, por otra parte, los costos que son generados durante 24 días laborales lo correspondiente a un mes son dados a la producción total durante este periodo de tiempo. El subtotal de los costos de producción de los valores diarios y mensuales determinaron los gastos que deberían ser asumidos si el biocarbón no fuese destinado a su comercialización, sino que será aprovechado como beneficio propio del productor. En el total de los costos de producción y distribución se retomaron los subtotales y fueron adicionados los costos de empaquetado y distribución, con el fin de llevar el producto a instancias comerciales en la línea de producción agropecuaria en la ciudad de Pereira, de éste modo se estaría siguiendo el modelo propuesto de economía circular para el aprovechamiento y reincorporación de la pulpa de café (*Figura 7*).

El análisis de estos datos permitió estimar el precio de venta del biocarbón de pulpa de café, de este modo el producto tendrá acceso al mercado y podrá tener la oportunidad de competir y posicionarse a partir de sus características, utilidad y efectividad, es así como se estableció un costo de \$458.23 por kilogramo de biocarbón que, comparado con los diferentes precios comerciales de éste producto encontrados en la web para Colombia, se hallan muy por debajo de éste valor. Cabe mencionar que los costos fijos no fueron incluidos en el análisis de costos de producción, por lo tanto, este no está inmerso en el precio de venta del biocarbón. El valor de estos costos podría incrementar significativamente el precio del biocarbón, el horno pirolítico es uno de ellos pues dependiendo de los materiales, dimensiones y características

con las que sea fabricado se verá reflejado en su costo, sin embargo, existen productos alternos que suplen la misma necesidad a precios módicos.

La empresa Mercado Libre en Colombia en su página web ofrece un tipo de biocarbón de gránulos pequeños a un precio de \$15.000 del cual se desconoce su procedencia y el tipo de biomasa utilizada para su producción y de la que se determina su composición físico-química y el porcentaje de macro y micronutrientes, de igual manera no se tiene especificaciones sobre la presentación, el volumen o la cantidad de biocarbón que se ofrece en el mercado. Según la Iniciativa Internacional de Biocarbón (IBI en inglés) al año 2015 es posible encontrar en el mercado alrededor de 56 productos de biocarbón puro, a los que se le ha asignado un precio promedio mayorista de US \$2,06 kg<sup>-1</sup>, equivalentes en COP \$7.722,94 y un promedio minorista de US \$3,08 kg lo que equivaldría a COP \$11.546,92. La comparación entre el modelo económico de oferta y demanda del biocarbón en Colombia con relación al resto de países productores de biocarbón da indicios de la baja producción y aplicabilidad que se le da en el país, esto puede ser el resultado del desconocimiento de los aportes ambientales, productivos y económicos que puede ofrecer el biocarbón.

El precio de venta determinado para del biocarbón de pulpa de café y los resultados obtenidos en la tabla de costos de producción pueden servir de insumo y facilitar la toma decisiones por parte del productor del biocarbón, de la Asociación o Comité al que pertenezca en cuanto a la implementación y comercialización del producto. Le permitirá beneficiarse de este por medio de la reintegración de la pulpa al proceso productivo del café en forma de biocarbón, por lo tanto se podrá evidenciar la reducción en la compra de suministros químicos agrícolas utilizados para la fertilización, aportes de nutrientes y optimización de los cultivos, obteniendo una mejora en la calidad de los granos café, un óptimo rendimiento de sus cultivos y de este modo se vería reflejada la retribución de la inversión realizada en la elaboración del biocarbón.

### **3.3.2 Regresión Hedónica de los macronutrientes contenidos en el biocarbón de pulpa de café**

Como es sabido y se ha discutido ampliamente en los apartados anteriores que el biocarbón presenta considerables beneficios agronómicos y ambientales en su aplicación al suelo, es por esto que se pretendió hacer la comparación con los productos comerciales para estos mismos fines, teniendo en cuenta la composición y uso tanto del biocarbón de pulpa de café como de los productos comerciales. Se tuvieron en cuenta los elementos correspondientes a los macronutrientes por ser estos esenciales tanto en plantas como en el suelo, el precio de venta de cada producto al público y la relación de precios en cuanto a los elementos de los fertilizantes inorgánicos (*Tabla 8*), con el fin de reconocer las particularidades que tiene cada uno de estos en cuanto a la disponibilidad de nutrientes necesarios para la efectiva fertilización, permitiendo observar cuales de estos productos se podrían sustituir si el biocarbón de pulpa de café se utilizará para diferentes procesos agrícolas.

**Tabla 8.** Composición de macronutrientes en productos agrícola.

<b>Elementos</b>	<b>Productos agrícolas</b>					
	<b>Propuesta</b>	<b>Inorgánicos</b>			<b>Orgánicos</b>	
	Biocarbón pulpa de café	Cal Dolomita	Fosfato Diamónico	Gallinaza	Lombricompost	Abono Orgánico
<b>N</b>	2,08%	-	18%	1,6%	1,19%	2%
<b>P</b>	1,41%	-	46,1%	3,6%	1,21%	3%
<b>K</b>	2,09%	-	-	2,8%	1,01%	1,63%
<b>Ca</b>	11,12%	36%	-	-	1,62%	1%
<b>Mg</b>	1,90%	16,9%	-	-	0,67%	15%
<b>S</b>	0,13%	-	-	-	-	1%
<b>Precio</b>						
<b>Venta 50</b>	90.000 (a)	15.000 (b)	96.000 (c)	7.000 (d)	20.000 (e)	12.000 (f)
<b>Kg (\$)</b>						
<b>Relación de</b>						
<b>precios (\$)*</b>	-	6.414	14.029	-	-	-

(\*) Cal Dolomita: Ca \$4.633, Mg: \$1.781- Fosfato Diamónico: N \$11.093, P \$2.936, a) Mercado Libre Colombia, b) Exiagrica, c) Palmiagro del Norte S.A.S, d) Conagricola, e) Lombricultura de Tenjo, f) AgroGo

Fuente: Elaboración propia.

Los fertilizantes de uso agrícola pueden ser materiales orgánicos o inorgánicos los cuales tienen como objetivo suministrar a las plantas uno o varios de los elementos nutricionales requeridos para su crecimiento adecuado, para que un producto sea considerado como fertilizante es indispensable que este sea soluble y químicamente disponible para la planta (Guerrero, 2004).

La agricultura convencional depende de la aplicación de fertilizantes minerales solubles, con el fin de lograr mayor rendimiento en los cultivos, pero la aplicación excesiva de este a producido eutrofización, toxicidad de las aguas, contaminación de aguas subterráneas, contaminación del aire, degradación del suelo y de los ecosistemas, desequilibrios biológicos y reducción de la biodiversidad, cabe destacar que las plantas solo absorben entre el 30 y 50% de los fertilizantes químicos generando que el resto se pierdan en el suelo (González, 2019). Para reducir el impacto generado por estos agroquímicos la tendencia actual, es la investigación y el desarrollo de nuevos procesos de fertilización orgánica para el mejoramiento del suelo y el crecimiento de las plantas, como la búsqueda de nuevos materiales o mezclas que además de proporcionar mejores condiciones de crecimiento al cultivo, disminuyan el impacto ambiental, mantengan el equilibrio general y el flujo de nutrientes, buscando el beneficio ambiental y económico, máximas eficiencias, reduciendo costos y haciendo el manejo adecuado de los desechos (González et al., 2015)

Es por esto que el biocarbón de pulpa de café se considera como una alternativa de uso en cuanto a los fertilizantes orgánicos dado que la materia prima implementada para su elaboración es un subproducto natural proveniente del beneficio del café, éste biocarbón puede llegar a ser un elemento innovador por las diversas utilidades que maneja, los contenidos de macro y micronutrientes que se forman y se encuentran en él, tras su transformación térmica le generan una serie de propiedades permitiendo su uso en la fertilidad de los suelos que han ido perdiendo la vitalidad, mejorando las condiciones física del suelo como porosidad, estructura e infiltración, activa el funcionamiento enzimático lo que permite acelerar los procesos que se dan en el suelo, las plantas y entre ambos, esto

contribuye al incremento de la eficiencia y productividad de los mismos suelos y de los cultivos que se benefician del biocarbón. Se convierte en un producto con mucho más valor por su capacidad de capturar y retener de manera prolongada uno de los gases de efecto invernadero que mayor incidencia tiene sobre la capa ozono como lo es el Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), cooperando con la mitigación del cambio climático.

Dentro de los fertilizantes inorgánicos tenidos en cuenta para la comparación de los diferentes productos agrícolas está la Cal Dolomita, una combinación de carbonato de calcio y carbonato de magnesio que cuenta con un doble propósito en el sustrato: Neutralizar los ácidos y aportar magnesio y calcio para ser absorbidos por la planta. Se disuelve lentamente en el sustrato, lo cual da como resultado un ajuste del pH en un tiempo de 2 a 4 meses y una reacción química que permite elevar o estabilizar el pH (Bueche, 2018). Por otro lado, los beneficios que el Fosfato Diamónico aporta a las plantas está relacionado como fuente de fósforo y nitrógeno para la nutrición de las plantas, este producto a su vez presenta una desventaja en la liberación de amonio en los casos que el pH del suelo está próximo a 7 ocasionando daños en las plantas y sus raíces (IPNI, s.f).

Para productos agrícolas orgánicos como la gallinaza, resultado de la mezcla del estiércol, orina de gallina y un sustrato que puede ser viruta de madera o cascara de arroz, usada como acondicionador orgánico para el suelo reponiendo la materia orgánica agotada debido a la explotación intensiva del suelo, permitiendo recuperar los niveles de productividad por propiciar la liberación de nutrientes esenciales para las plantas y aumentar la carga microbiana (Conagrícola, 2020). El lombricompuesto se obtiene a partir de la descomposición de material orgánico por la acción de la lombriz californiana, considerado como corrector de suelo cuya característica fundamental es su estabilidad por tratarse de la humificación de la materia orgánica utilizada, pues no da lugar a fermentación o putrefacción, produce un aumento del porte de las plantas, árboles y arbustos, protege de enfermedades y cambios bruscos de humedad y temperatura durante el trasplante de los mismos (Infoagro, 2017), el abono orgánico permite la formación de agregados generando una mayor retención de agua, intercambio de gases y nutrientes (Conagrícola, 2020).

Dado esto el biocarbón de pulpa de café se podría denominar como un producto agrícola orgánico por las características que presenta, permitiendo sustituir la alta gama de fertilizantes químicos usados actualmente en el sector agrícola por este biocarbón, generando beneficios para el mejoramiento del suelo, aumento a lo largo del tiempo capa orgánica del suelo y con su aplicación frecuente se mejoran características importantes para el manejo productivo: Compactación, permeabilidad, aireación, pH, absorción de nutrientes y humedad, entre otros (Arango, 2017), cabe resaltar que por ser un producto con tan alta capacidad productiva su costo es un poco elevado frente al precio de los demás productos (*tabla 8*), pues es evidente que frente a los fertilizantes inorgánicos presenta una composición de nutrientes mucho más completa permitiendo ofrecerle a las plantas y al suelo un mayor número de servicios.

La presencia de elementos como metales pesados, cationes básicos y compuestos orgánicos (poli-aromáticos condensados) le conceden estabilidad biológica y química al biocarbón de manera prolongada permitiéndole tolerar la oxidación química y biológica que favorece su permanencia durante cientos a miles de años en el suelo (Lehmann y Joseph, 2015), mientras que los demás productos cuentan con un tiempo de permanencia mucho más corto por lo que

habría que recurrir a múltiples aplicaciones al año, lo que indicaría un incremento en mano de obra y en la necesidad reiterativa de adquirir los productos, por lo tanto se terminaría invirtiendo más de lo que cuesta el biocarbón. Además, la constante aplicación de fertilizantes, especialmente químicos podría producir la degradación paulatina del suelo, contribuir a la presencia y acumulación de elementos contaminantes como metales pesados e hidrocarburos que pueden ser transportados hacia fuentes de aguas subterráneas y superficiales, acumularse en los tejidos de plantas, animales y hasta de las personas representando un riesgo que atenta contra la vida y la salud.

Por otra parte, los fertilizantes orgánicos como ya se había mencionado también producen impactos en el ambiente y la salud humana por la presencia de vectores transmisores de patógeno y enfermedades (Tercero y Olalla, 2008). Al igual que los químicos, su permanencia en el suelo se da lapsos de tiempos cortos debido a la degradación microbiana a la que se encuentra expuesto este tipo de productos, y pueden ser removidos fácilmente por la acción del agua y el lavado de los suelos principalmente en temporadas de lluvia.

#### **4. CONCLUSIONES**

Para el desarrollo eficaz de este trabajo investigativo se realizaron diferentes momentos metodológicos los cuales permitieron llevar a cabo el adecuado cumplimiento del objetivo general, mediante la ejecución de momentos claves que fueron dando sentido a la investigación, partiendo de la búsqueda de lo general en cuanto a la información y relación que presentan los diferentes biocarbones orgánicos estudiados, y llegando a lo particular donde se lograron evidenciar las potencialidades ambientales y agroindustriales que tiene el biocarbón de pulpa de café.

A partir de la comparación de los diferentes elementos nutricionales y las propiedades físico-químicas de los biocarbones estudiados se identificó que el biocarbón de pulpa de café logra llegar a tener similitudes con algunos de los datos descritos en los elementos de los macronutrientes, micronutrientes y características físico-químicas de los diferentes biocarbones, sirviendo esto de referencia para determinar aquellas variables que se pueden considerar más importantes para la caracterización de los usos que tiene o que puede potencializar el biochar de pulpa de café, esto fue de vital importancia ya que permitió dar la identificación de los posibles usos agrícolas del biocarbón de pulpa de café, en donde se lograron identificar que las biomásas de residuos de hojas, residuos de arbustos, residuos de árboles, paleta astilla, desechos alimentarios y cáscara de avellana presentan similitudes en cuanto a los usos del biochar de pulpa de café, siendo estos principalmente de fertilización de suelos, mitigación del cambio climático, aporte de nutrientes y retención de contaminantes.

Considerando que la producción diaria de biocarbón es de 150 kg y mensual 3600 kg, se estimaron unos costos de producción que arrojaron valores de \$73.024 y \$1.649.611 respectivamente; lo que lleva a un costo de producción de \$458.23 por kilogramo considerablemente bajo para este tipo de productos por sus pocos insumos y que son de bajo costo, análisis realizado por la exclusión de los costos fijos, los costos más elevados están

vinculados con la mano de obra directa, determinado como un beneficio social debido a que al trabajador se le fue asignado un sueldo mínimo con las prestaciones sociales correspondiente, esto permite asegurarle al campesino un trabajo y una remuneración digna que se verá reflejada en la mejora de su calidad de vida y en su rendimiento laboral por la satisfacción y seguridad que ésta labor le genera. Se determinaron condiciones de mejora de la calidad ambiental por la reducción en la contaminación y degradación ambiental producida por la inadecuada disposición de la pulpa de café post-beneficio. La rentabilidad económica dependerá de los beneficios ya mencionados y podría verse reflejada en un mediano plazo, por lo tanto, los beneficios socioeconómicos y ambientales se convierten en dinámicas recíprocas en donde el “recibir” o “ganar” requiere de un esfuerzo e implica el “ceder”, formalizando así los principios de actuación de la economía circular.

Se pudo demostrar que el biocarbón de pulpa se postula como un producto sostenible y a su vez como una estrategia de producción más limpia que cumple con las especificaciones dadas desde el enfoque de la economía circular, un residuo orgánico que es tomado como materia prima para ser transformado y finalmente reincorporado a los diferentes procesos de la industria agrícola como un producto orgánico capaz de contribuir al mejoramiento y productividad sobre las características físicas, químicas y biológicas del suelo, minimizando los impactos negativos provenientes de la recurrente utilización de fertilizantes inorgánicos generando beneficios ambientales y a su vez socioeconómicos. Esto permitió establecer que las prácticas agrícolas pueden ser desarrolladas de forma eficiente sin la presencia de productos químicos que lo que finalmente logran es un efecto contrario sobre el ambiente y el bienestar de las personas. El estudio referente al biocarbón ha tomado relevancia en los últimos años en países como Estados Unidos y Brasil por ser un producto innovador, en Colombia aún es un campo de investigación relativamente nuevo al cual no solo se le debe seguir propiciando información sino también aplicabilidad.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aker, C. (2014). *Evaluación del uso de estufas ecológicas, análisis de la producción y uso del biocarbón como enmienda del suelo en los rendimientos de maíz (Zea mays) en tres municipios de León, Nicaragua*. 71.
- Alvarado, G. (2012). Fosfato Diamónico. *Ypf, Vol. 1*(17), 18–46.  
[http://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/3D71CA0246B0EA8E85257BBA0059CD97/\\$FILE/NSS-ES-17.pdf](http://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/3D71CA0246B0EA8E85257BBA0059CD97/$FILE/NSS-ES-17.pdf)
- Anal, C., & Alguacil, F. J. (2013). *Máster Universitario en Ciencia y Tecnología Química Módulo : Química Analítica BIOCOMBUSTIBLES MEDIANTE PIRÓLISIS DE BIOMASA RESIDUAL ” Andrea Urien Pinedo*.
- Bernardo, M., Lapa, N., Gonçalves, M., Mendes, B., Pinto, F. (2012) Study of the organic extraction and acidic leaching of chars obtained in the pyrolysis of plastics, tire rubber and forestry biomass wastes. *Procedia eng.* 2012;42:1739–1746.
- Bressani, R (1978). Pulpa de café. Composición tecnológica y utilizada. Artículo: Posibles usos de los subproductos del grano de café pag: 31-37
- Causado Rodríguez, E., Viana Barceló, R., & Jiménez Falquez, O. (2008). Estimación de

- un modelo hedónico para el precio de los predios en las áreas de Pozos Colorados, Bello Horizonte y Don Jaca de la ciudad de Santa Marta D.T.C.H, Colombia. *CLIO América*, 2(3), 99–110. <https://doi.org/10.21676/23897848.356>
- Cenicafé. (1958). *01. Historia del café.pdf*.
- Didier González, J., Mosquera, J. D., Trujillo, A. T., & Resumen, (2015). Environmental effects and impacts on the production and application of supermagro biofertilizer to grow watermelon. *Revista Ingeniería y Región*, 13(1), 103–111.
- Elías, G (1978). Composición química de la pulpa de café y otros subproductos. Artículo: Posibles usos de los subproductos del grano de café pag: 19-29
- Ellen Macarthur Foundation. (2012). Hacia Una Economía Circular: Motivos económicos para una transición acelerada. *Fundación Ellen MacArthur*, 22. [https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Executive\\_summary\\_SP.pdf](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Executive_summary_SP.pdf)
- Enders, A., Hanley, K., Whitman, T., Joseph, S., & Lehmann, J. (2012). Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresource Technology*, 114, 644–653. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.022>
- FAO. (2015). Macronutrientes y micronutrientes. *Organización de Las Naciones Unidas Para La Alimentación y La Agricultura*, 2. <https://doi.org/10.1186/1477-7827-8-112>
- FAO, O. de las N. U. para la A. y la A., & OCDE, O. para la C. y el D. E. (2019). *OCDE/FAO Perspectivas Agrícolas 2019-2028 - Enfoque Especial: America Latina*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/7b2e8ba3-es>
- Federación Nacional de cafeteros. (2006). Descripción del proceso productivo y del beneficio del café. Guía tecnológica del cultivo. *Guía Ambiental Para El Sector Cafetero*, 51–80. <https://www.federaciondefcafeteros.org/static/files/8Capitulo6.pdf>
- Federación Nacional de cafeteros. (1927-2017). 90 años Vivir el café y sembrar el futuro / Álvaro Tirado Mejía... [et al]; Karim León Vargas, Juan Carlos López Díez, editores. Medellín: Editorial EAFIT, 2017, 200 p.; 28 cm. (Ediciones Universidad EAFIT)
- Figueroa, E., Pérez, F., & Godínez, L. (2012). La producción y el consumo del café. In *Ecorfan*. [www.ecorfan.org/spain](http://www.ecorfan.org/spain)
- Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario. (2014). Perspectiva del sector agropecuario Colombiano. *Ministerio de Agricultura*, 28.
- González Ulibarry, F. (2019). Consecuencias ambientales de la aplicación de fertilizantes. *Asesoría Técnica Parlamentaria*.
- Granados, C. (2004). El impacto ambiental del café en la historia costarricense. *Diálogos Revista Electrónica*, 4(2), 120. <https://doi.org/10.15517/dre.v4i2.6280>
- Guerra, P. (2014). Producción y caracterización de Biochar a partir de la biomasa residual de sistemas agroforestales y de agricultura convencional en la Amazonía Peruana. *Universidad Nacional Agraria La Molina*, 101.
- Guerrero, R. (2013). Manual técnico. Propiedades Generales de los Fertilizantes. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53, 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Herguedas, A., Taranco, C., Rodríguez, E., & Paniagua, prado. (2012). Biomasa, Biocombustibles Y Sostenibilidad. *Transbioma*, 13(2), 105–109.
- Hernández, C.F. (2018). Beneficios económicos, sociales y ambientales en el aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos. *Revista de Investigación Agropecuario y Desarrollo Sostenible*. Vól. 3 Núm.2 (2018)
- Herrera, E., Feijoo, C., Alfaro, R., Solís, J., Gómez, M., Keiski, R., & Cruz, G. (2018).



- Biochar based on residual biomasses and its influence over seedling emergence and growth in vivarium of *Capparis scabrida* (Sapote). *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 569–577. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.13>
- Houben, D., Sonnet, P., & Cornelis, J. T. (2014). Biochar from *Miscanthus*: A potential silicon fertilizer. *Plant and Soil*, 374(1–2), 871–882. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1885-8>
- Iezzi, M. (s.f). Economía Circular. Resumen Ejecutivo
- Kalmanovitz, S. (1994). Economía y Nación Una breve historia de Colombia. Cuarta Edición Corregida y Aumentada. TERCER MUNDO S.A. BOGOTÁ.
- Kalmanovitz, S. (2015). Breve historia económica de Colombia. Bogotá : Utadeo, 2015.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127(October), 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Kirkby, E., & Römhild, V. (2008). Introducción. *Micronutrientes En La Fisiología de Las Plantas: Funciones, Absorción y Movilidad (Versión En Español )*, 6. [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/3FA84D0333FEDEAA852579A0006BF733/\\$FILE/Micronutrientes en la Fisiología de las Plantas.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/3FA84D0333FEDEAA852579A0006BF733/$FILE/Micronutrientes%20en%20la%20fisiologia%20de%20las%20plantas.pdf)
- Lehmann, J., Joseph, S. (2015). Biochar for environmental management: science, technology and implementation. *Biochar environ. Manag. Sci. Technol.* New york: earthscan; 2015.
- McLaughlin, H., Anderson, P. S., Shields, F. E., & Reed, T. B. (2009). All Biochars are not Created Equal and How to Tell them Apart. *North American Biochar*, 2(August), 1–36.
- Mercet et al. (2018). Asociación Pacto Industrial de la Región Metropolitana de Barcelona. *Qué Es La Economía Circular y Por Qué Es Importante Para El Territorio*, 4, 56. [http://www.pacteindustrial.org/public/docs/papers\\_publications/6e3474fb7a3a924fac653ff095bfc0c9.pdf%0Awww.pacteindustrial.org](http://www.pacteindustrial.org/public/docs/papers_publications/6e3474fb7a3a924fac653ff095bfc0c9.pdf%0Awww.pacteindustrial.org)
- Moraga, G., Huysveld, S., Mathieux, F., Blengini, G.A., Alaerts, L., K Van Acker, Meester, S., Dewulf, J. (2019) Resources, conservation & recycling circular economy indicators: what do they measure? *Resour conserv recycl. Elsevier*; 2019;146:452–461.
- Murthy, P. S., & Madhava Naidu, M. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition - A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 66, 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.005>
- B. I., Rebolledo, A. E., López, G. P., Moreno, C. H., Collado, J. L., Alves, J. C., Valtierra, E., & Etchevers, J. D. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 367–382.
- Oliván, A. (1876). *Manual de agricultura. Nueva ed.*, 298.
- Orozco, M. J. A. (2017). Abonos orgánicos como alternativa para la conservación y mejoramiento de los suelos. *Corporación Universitaria Lasallista*, 55. [http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/2036/1/Abonos\\_organicos\\_a lternativa\\_conservacion\\_mejoramiento\\_suelo.pdf](http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/2036/1/Abonos_organicos_a%20alternativa_conservacion_mejoramiento_suelo.pdf)
- Puerta Quintero, G. I. (2006). Buenas Prácticas Agrícolas para el café. *Avances Tecnicos* 349, *Cenicafé*, 3.
- Rodríguez Valencia, N., & Zambrano Franco, D. (2010). Los subproductos del café: fuente de energía renovable. *Avances Técnicos Cenicafe*, 3, 8. <https://doi.org/ISSN-0120->

0178

- Rojas López, J. R. (2007). *Capítulo 3: Metodología de Valuación*. 103. 103–167.  
<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93437>
- Román, J. G. (2013). El beneficiado del café ¿Fue un factor de contaminación en la segunda mitad del siglo XIX? *Diálogos Revista Electrónica de Historia*, 4, 3–34.  
<https://doi.org/10.5944/educxx1.17.1.10708>
- Serna-Jiménez, J. A., Torres-Valenzuela, L. S., Martínez Cortínez, K., & Hernández Sandoval, M. C. (2018). Aprovechamiento de la pulpa de café como alternativa de valorización de subproductos. *Revista ION*, 31(1), 37–42.  
<https://doi.org/10.18273/revion.v31n1-2018006>
- Serpa Flórez, F. (1964). Historia del café. *Boletín Cultural y Bibliográfico*, 7(9), 1604–1607.
- Suarez, J. (2010). Aprovechamiento de los residuos sólidos provenientes del beneficio del café, en el municipio de Betania Antioquia: usos y aplicaciones. *Microbiology*, 156(5), 1527–1537. <https://doi.org/10.1099/mic.0.035840-0>
- Urien Pinedo, A. (2013). Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual. *Tesis De Máster*, 83.  
[http://digital.csic.es/handle/10261/80225%0Ahttp://digital.csic.es/bitstream/10261/80225/1/BIOCARBONES\\_CENIM\\_CSIC.pdf](http://digital.csic.es/handle/10261/80225%0Ahttp://digital.csic.es/bitstream/10261/80225/1/BIOCARBONES_CENIM_CSIC.pdf)
- Van Zwieten, L., Kimber, S., Downie, A., Morris, S., Petty, S., Rust, J., & Chan, K. Y. (2010). A glasshouse study on the interaction of low mineral ash biochar with nitrogen in a sandy soil. *Australian Journal of Soil Research*, 48(6–7), 569–576.  
<https://doi.org/10.1071/SR10003>
- Villanueva-Mejía, D. F. (2018). Estudios sobre la Bioeconomía como fuente de nuevas industrias basadas en el capital natural de Colombia. *Estudios Sobre La Bioeconomía Como Fuente de Nuevas Industrias Basadas En El Capital Natural de Colombia*, 1–49.
- Wong-paz, J. E., A. C. N. (2015). *Alternativas Actuales para el Manejo Sustentable de los Residuos de la Industria del Café en México*. June.

### Referencias tomadas de la web

Abonos Conagrícola (s.f). Abono orgánico. Recuperado de:  
[http://abonosconagricola.com/abono\\_organico.html](http://abonosconagricola.com/abono_organico.html)

Abonos Conagrícola (s.f). Gallinaza compostada. Recuperado de:  
[https://www.abonosconagricola.com/gallinaza\\_compostada.html](https://www.abonosconagricola.com/gallinaza_compostada.html)

Ayala, F. (2016). El Biocarbón. Recuperado de:  
<https://www.engormix.com/agricultura/articulos/biocarbon-t33045.htm>

Banco de la República (2019). Coyuntura del sector agropecuario colombiano. Recuperado de: <https://www.banrep.gov.co/es/recuadro-2-coyuntura-del-sector-agropecuario-colombiano>

Buechel, T. (13 de Diciembre de 2018). *La cal calcítica y la cal dolomítica*. Promix. Recuperado de: <https://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/la-cal-calcitica-y-la-cal-dolomitica/>

Café de Colombia (s.f) *Historia del café de Colombia*. Recuperado de: <https://www.cafedecolombia.com/particulares/historia-del-cafe-de-colombia/>

Centro Nacional de Investigación de Café (2016). *Beneficio del café*. Recuperado de: [https://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos\\_cafe/beneficio](https://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos_cafe/beneficio)

Comité de Cafeteros de Caldas (s.f). *Tipos de Caficultores*. Recuperado de: [https://caldas.federaciondecafeteros.org/fnc/nuestros\\_cafeteros/category/118](https://caldas.federaciondecafeteros.org/fnc/nuestros_cafeteros/category/118)

Domínguez, J.C. (28 de marzo de 1998). Los empleados de su finca. *El Tiempo*. Recuperado de <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-783414>

Falcao, N. (2012). Pesquisadores garimpam a história contida na terra preta de índio. *Globo Natureza*, con información de Globo Rural. Recuperado de: <http://g1.globo.com/natureza/noticia/2012/06/pesquisadores-garimpam-historia-contida-na-terra-preta-deindio.html>.

Federación nacional de cafeteros de colombia (2016). *Bien aprovechada, la pulpa de café deja de ser un desperdicio*. Recuperado de: [https://www.federaciondecafeteros.org/pergamino-fnc/index.php/comments/bien\\_aprovechada\\_la\\_pulpa\\_del\\_cafe\\_deja\\_de\\_ser\\_un\\_desperdicio](https://www.federaciondecafeteros.org/pergamino-fnc/index.php/comments/bien_aprovechada_la_pulpa_del_cafe_deja_de_ser_un_desperdicio)

Gobierno de Colombia (2019) Estrategia Nacional de Economía Circular. Recuperado de: [http://www.andi.com.co/Uploads/Estrategia%20Nacional%20de%20EconA%CC%83%C2%B3mia%20Circular-2019%20Final.pdf\\_637176135049017259.pdf](http://www.andi.com.co/Uploads/Estrategia%20Nacional%20de%20EconA%CC%83%C2%B3mia%20Circular-2019%20Final.pdf_637176135049017259.pdf)

Infoagro ( 9 de agosto de 2020). *Lombricomposto, vermicompost o humus de lombriz*. Recuperado de: <https://mexico.infoagro.com/lombricomposto-vermicompost-o-humus-de-lombriz/>

López, D, M (2014). *Composición química y nutracéutica del residuo sólido del café (Coffea arabica L) utilizado y la actividad de los productos de su fermentación colónica in vitro en un modelo de inflamación*. Tesis de maestría para optar por el título de: Maestro en ciencia y Tecnología de alimentos. Recuperado de: <http://doczz.net/doc/1075178/composici%C3%B3n-qu%C3%ADmica-y-nutrac%C3%A9utica-del-residuo-s%C3%B3lido-del...>

López, J. (27 de diciembre de 2019). Un empleado de salario mínimo vale \$1,479.684 para su empresa cada mes. *La República*. Recuperado de <https://www.larepublica.co/economia/un-empleado-de-salario-minimo-vale-1479684-para-su-empresa-cada-mes-2947773>

López, J.F. (s.f) Beneficio. Recuperado de:  
<https://economipedia.com/definiciones/beneficio.html>

Montoya, L.M. (2016). *Estudio de las interacciones planta-bacteria-biocarbón y de su efecto promotor de la productividad de especies de cultivos*. Trabajo de grado para optar al título de Bióloga, Universidad ICESI. Recuperado de:  
[https://repository.icesi.edu.co/biblioteca\\_digital/bitstream/10906/81093/1/montoya\\_estudio\\_interacciones\\_2016.pdf](https://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/81093/1/montoya_estudio_interacciones_2016.pdf)

Moreno González, A. (2018). *Economía circular: crecimiento inteligente, sostenible e integrador*. Para optar por el título de: ingeniera comercial, universidad de ciencias aplicadas y ambientales. Recuperado de:  
<https://repository.udca.edu.co/bitstream/11158/954/1/econom%c3%ada%20circular%20-%20crecimiento%20inteligente%2c%20sostenible%20e%20integrador.pdf>

Nadal, A. (2019, 14 de agosto). Capitalismo, agricultura y cambio climático. *La Jornada*. Recuperado de: <https://www.jornada.com.mx/2019/08/14/opinion/021aleco>

NIETO, L. E. (2002). *Módulo 6: Análisis Multivariado*. Recuperado de:  
[http://allman.rhon.itam.mx/~lnieto/index\\_archivos/Modulo61.pdf](http://allman.rhon.itam.mx/~lnieto/index_archivos/Modulo61.pdf)

Ocampo, J.A (2019, 23 de julio). Una brevísima historia económica de Colombia. *La República*. Recuperado de: <https://www.larepublica.co/analisis/jose-antonio-ocampo-513451/una-brevisima-historia-economica-de-colombia-2887660>

Organización de los Estados Americanos-OAS (s.f). 6.1 Evaluación del impacto ambiental, económico y social. Recuperado de:  
<http://www.oas.org/OSDE/publications/Unit/oea49s/ch29.htm>

Paisaje Cultural Cafetero (2017) *Capital social estratégico- Federación Nacional de Cafeteros*. Recuperado de: <http://paisajeculturalcafetero.org.co/contenido/federacion-de-cafeteros>

Paisaje Cultural Cafetero (2017) *El Paisaje Cultural Cafetero declarado como Patrimonio Mundial*. Recupero de: <http://paisajeculturalcafetero.org.co/contenido/descripcion>

Pérez, J., Barrera, R. & Ramírez, G. (2015). Integración de plantaciones forestales comerciales colombianas en conceptos de biorrefinería termoquímica: una revisión. *Colombia Forestal*, 18(2),273-294. Recuperado de:  
<http://www.scielo.org.co/pdf/cofo/v18n2/v18n2a07.pdf>

Portafolio (2020, 14 de enero). *El Café aportó \$7,2 billones a la economía del país en 2019*. *Portafolio*. Recuperado de: <https://www.portafolio.co/economia/el-cafe-aporto-7-2-billones-a-la-del-pais-en-2019-537124>

Reyes, G. (2018). *Aprovechamiento de residuos forestales en forma de biocarbón como alternativa agroecológica para la producción de madera de calidad de Acacia mangium*

Willd. Tesis doctoral para optar al título de Doctor en Agroecología, Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de:  
<http://bdigital.unal.edu.co/71444/7/GiovanniReyesMoreno.2018.pdf>

Sánchez, A., Ávila, E., Restrepo, H. (2020). Use of Biocarbón in Agriculture. *Acta Biológica Colombiana*. Volumen 25, Número 2, p. 327 - 338. Recuperado de:  
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/actabiol/article/view/79466/pdf>

Semana Sostenible (2020, 28 de enero). Deforestación: motor de emisión de dióxido de carbono en Colombia. *Semana*. Recuperado de: <https://normasapa.com/como-referenciar-articulos-de-revistas-con-normas-apa/>

Tercero, M.J. y Olalla, R. (2008) Enfermedades tropicales transmitidas por vectores. Medidas preventivas y profilaxis, *Elsevier*. Vol. 27. Núm. 6. p.78-89 (Junio 2008)  
Recuperado de: <https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-articulo-enfermedades-tropicales-transmitidas-por-vectores--13123519>

## ANEXOS

### Anexo 1

[ANEXO 1. Base de datos.xlsx](#)

### Anexo 2

*Análisis de varianza de los elementos correspondientes a las biomásas estudiadas*

Macronutrientes								Micronutrientes				
FV	gl	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Cu	Mn	Zn	Na
Material	7	31,7*	271,81**	6440,8*	2611,5*	21,24**	15489,5*	2907934,2*	511,79**	29463,8*	2927,2*	43308996,1**
Error	15	8,3*	52,08**	2381,4*	984,6*	5,78**	4418,5*	1093879,9*	5,8**	18826,4*	119,9*	879621,8**
Total	22											

*Continuación. Análisis de varianza de los elementos correspondientes a las biomásas estudiadas*

Características físico-químicas									
FV	gl	C	O	H	Cenizas	Cf	pH	MO	CE
Material	7	965,5**	589*	5,93**	520,2**	925,1**	5,7**	243774,1*	5,2
Error	15	188,6**	158,2*	0,65**	42,4**	103,9**	1**	173490,9*	3,79
Total	22								